Das Verhalten von Selenkristallen gegenüber Wechselstrom

Inaugural-Dissertation
zur
Erlangung der Doktorwürde
der
Hohen Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
der
Georg-August-Universität zu Göttingen

vorgelegt von

Walther Bock
aus Göttingen

Göttingen 1925.
Druck der Göttinger Handelsdruckerei.

Referent: Herr Professor Dr. M. Reich.
Tag der mündlichen Prüfung: 30. Juli 1924.

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

Das Verhalten von Selenkristallen gegenüber Wechselstrom

Inhalt:

§ 1. Einleitung 5
§ 2. Ziel der Arbeit 5
§ 3. Bisherige Arbeiten 5
§ 4. Herstellung der Selenkristalle 9
§ 5. Vorversuche 11
§ 6. Spannungseffekt und Dunkelträgheit 14
§ 7. Statische und dynamische Leitfähigkeitskurve und ihre experimentelle Ermittlung 23
§ 8. Gleichstrom- und Wechselstromleitfähigkeit 33
§ 9. Anomale Gleichrichtung 41
§ 10. Wechselstromeffekt 50
§ 11. Zusammenfassung 60
§ 12. Literaturzusammenstellung 61

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41548128_0093

§ 1. Einleitung.

Das metallische Selen zeigt neben der schon lange bekannten und in der Technik angewandten Eigenschaft, bei Belichtung seinen elektrischen Widerstand zu ändern, noch andere Besonderheiten in Bezug auf die Elektrizitätsleitung, durch die es sich von den gewöhnlichen Metallen erheblich unterscheidet: So läßt sich die elektrische Leitfähigkeit des Selens durch mechanischen Druck und ebenfalls durch die angelegte Spannung bzw. den hindurchgehenden Strom in weiten Grenzen ändern. Während der sogenannte Lichteffekt von zahlreichen Autoren studiert ist, haben die übrigen Erscheinungen der elektrischen Leitung im Selen nur vereinzelt Beachtung gefunden. Wie nun die Arbeiten von Gudden und Pohl (1)[1]) über den Lichteffekt an isolierenden Kristallen nahelegen, wird man auch über das Wesen des Lichteffektes am Selen erst dann volle Aufklärung erwarten können, wenn die Leitungsverhältnisse im Selen genügend geklärt sind, da zwischen beiden, wie aus den genannten Arbeiten zu schließen ist, eine enge Beziehung besteht. Es mag deshalb angebracht erscheinen, gerade den Leitungsvorgängen im Selen besondere Aufmerksamkeit zuzuwenden.

§ 2. Ziel der Arbeit.

Der Zweck der vorliegenden Arbeit ist nun, insbesondere das Verhalten des Selens gegenüber Wechselstrom eingehender zu studieren. Es liegen in dieser Richtung die Beobachtungen mehrerer Forscher vor, die aber kein einheitliches Bild ergeben. Es wurde deshalb unternommen, einerseits das bisherige Beobachtungsmaterial durch Untersuchungen an einzelnen Selenkristallen zu erweitern, andererseits auf Grund dieser Messungen eine Deutung einer Reihe bisher unaufgeklärter Erscheinungen, die bei Wechselstrom auftreten, zu geben und so das Bild einheitlicher zu gestalten.

§ 3. Bisherige Arbeiten über diesen Gegenstand.

Es sei zunächst kurz über die bisherigen Arbeiten, die sich mit den Wechselstromvorgängen am Selen befassen, berichtet. Auf einzelne dieser Arbeiten wird im Laufe der Untersuchungen noch näher einzugehen sein.

1) Pochettino und Trabacchi (2) beobachteten einen Einfluß des Wechselstromes auf den Widerstand und die Lichtempfindlichkeit

[1]) Die in Klammern befindlichen Zahlen beziehen sich auf die in § 12 aufgeführten Literaturzusammenstellungen.

des Selens. Ihre Untersuchungen beziehen sich auf Zellen, die einige Zeit nach der Herstellung einen äußerst kleinen Widerstand annehmen und negative Lichtempfindlichkeit (Zunahme des Widerstandes bei Belichtung) zeigen. Wird an diese Zellen kurze Zeit (10 Sec.) eine genügend hohe Wechselspannung (50 bis 100 Volt) angelegt, so nimmt der Widerstand sofort sehr hohe Werte an, und die negative Lichtempfindlichkeit geht in eine positive über. Nach Aufhören des Wechselstromes hält die Wirkung noch an. Die Zellen kehren dann nach einigen Tagen in ihren früheren Zustand zurück. Für dies Verhalten gibt Chr. Ries (3) eine Erklärung, indem er darauf hinweist, „daß diese Zellen sowohl in der Herstellung als in ihrem ganzen Verhalten vollständig seinen hygroskopischen Präparaten (anomale Zellen) gleichen, sodaß die daran beobachtete negative Lichtempfindlichkeit auf den Einfluß von Feuchtigkeit zurückzuführen ist. Da die Behandlung mit Wechselströmen denselben Erfolg hat, wie eine Trocknung der Zellen, muß man annehmen, daß die Wechselströme eine Verdrängung und Verdampfung der Feuchtigkeit bewirken." Es handelt sich also bei dieser Erscheinung nicht um eine spezifische Eigenschaft des Selens, sondern nur um eine indirekte Wirkung des Wechselstromes.

2) An denselben Zellen untersuchen die beiden Autoren in einer weiteren Arbeit (4) die Abhängigkeit des Widerstandes von der angelegten Gleich- und Wechselspannung. Vor der eigentlichen Untersuchung werden die Zellen, genau wie bei den früheren Versuchen, mit einer hohen Wechselspannung behandelt, bis ihr Widerstand einen Höchstwert erreicht hat. Sie finden in beiden Fällen eine beträchtliche Abnahme des Widerstandes bei höherer Spannung, vor allem bei den Zellen mit sehr hohem Widerstand (Spannungseffekt). Der Widerstand bei Gleich- und Wechselstrom weist kleine unregelmäßige Unterschiede bei den verschiedenen Spannungen auf. Auch scheint eine Selenzelle im Wechselstromkreis eine merkliche Phasenverschiebung hervorzurufen, wie mit Hilfe der Drei-Voltmeter-Methode festgestellt wird.

3) An einer Reihe von Zellen verschiedener Herstellungsart stellt Pochettino (5) bei Durchgang von Wechselstrom eine bedeutende Gleichrichtung fest. Die Zellen verhalten sich analog den elektrolytischen Gleichrichtern. P. mißt diese Gleichrichtung, indem er die Wechselstromkurve mittels einer im Trabacchi angegebenen Methode punktförmig aufnimmt und den Unterschied der beiden Kurvenhälften bestimmt. Er findet: Die Gleichrichtung nimmt zu, wenn der Widerstand durch äußere Einflüsse (Temperatur) erhöht wird. Das Elektrodenmaterial scheint von Einfluß auf den Effekt zu sein. Besonders bei den Zellen mit

Abweichungen vom Ohmschen Gesetz tritt die Erscheinung deutlich auf. Die Gleichrichtung kann nicht auf einem thermoelektrischen Effekt beruhen.

4) J. Luterbach (6) findet bei seinen Untersuchungen über die Abhängigkeit des Selenwiderstandes von der angelegten Spannung einen erheblichen Unterschied zwischen dem Gleichstrom- und Wechselstromwiderstande. Der Spannungseffekt bei Wechselstrom ist nicht so ausgeprägt wie bei Gleichstrom. Seine Messungen beziehen sich nur auf eine Zelle, die insofern Besonderheiten aufweist, als sie einen Polarisationsstrom und eine eigene elektromotorische Kraft im Dunkeln besitzt.

5) H. Greinacher (7) stellte bei seinen Untersuchungen über den Dunkelwiderstand von Selenzellen in der Brückenschaltung bei Stromdurchgang Widerstandsunterschiede in beiden Richtungen fest, die mit der Dauer des Stromdurchganges zunahmen. Infolge dieser Unterschiede, die er teilweise auf Polarisation, teilweise auf wahre Widerstandsänderung durch den Strom zurückführt, war bei Wechselstromdurchgang eine Gleichrichtung zu erwarten. Tatsächlich trat in den meisten Fällen eine Gleichstromkomponente auf, die aber die entgegengesetzte Richtung hatte. Der Effekt ging nach kurzer Zeit zurück. Um ihn dauernd aufrecht zu erhalten, benutzte er gleichzeitig Gleichstrom und Wechselstrom. Hier fand er aber eine besonders starke Gleichrichtung, in entgegengesetzter Richtung wie ohne Gleichstrom. Diese Erscheinung, die er mit großer Regelmäßigkeit beobachtete, brachte ihn auf die Vermutung, daß es sich beim Wechselstromdurchgang um denselben Vorgang handele, wie beim Auftreffen von Licht (weil sowohl durch Wechselstrom wie durch Licht eine Vergrößerung des ursprünglichen Stromes bewirkt wird). Er wird in dieser Ansicht gestützt durch den weitgehenden Parallelismus des „Wechselstromeffektes" und des Lichteffektes.

6) Bei der weiteren Verfolgung dieses Wechselstromeffektes in Abhängigkeit von der Frequenz findet Greinacher in Gemeinschaft mit C. Miller (8) eine besondere Art von Gleichrichtung am Selen, die, wie er aus seinen eingehenden Untersuchungen schließt, vom zeitlichen Verlauf der Wechselstromkurve abhängt und ihre Richtung mit Kommutieren des Stromes ändert. Er nennt diesen Effekt, für den er verschiedene Erklärungsmöglichkeiten zuläßt, anomale Gleichrichtung im Gegensatz zu der sonst beobachteten normalen Gleichrichtung (die ihr Vorzeichen bei Stromkommutierung nicht ändert). Bei der Untersuchung der Frequenzabhängigkeit berücksichtigt er diese Gleichrichtung und findet eine Abnahme des Wechselstromeffektes bei höheren Frequenzen. Auch

an normalen Zellen von Fürstenau stellt Greinacher den Wechselstrom-effekt fest. (9).

7) Cr. Ries (10) nimmt die Greinacherschen Versuche unter abgeänderten Versuchsbedingungen auf. Es ergeben sich eine Reihe neuer Tatsachen, die einen Parallelismus von Gleichrichtereffekt und Wechselstrom anzeigen (beide Effekte nehmen z. B. mit dem Widerstande der Zelle zu). Im besonderen zeigt sich, daß die Gleichrichterwirkung bei reinem Wechselstrom bei starker Belichtung zurückgeht bzw. ganz verschwindet (von ihm G-Effekt genannt), ebenso der Wechselstromeffekt (also wenn gleichzeitig Gleichstrom und Wechselstrom vorhanden ist). Ries sieht deshalb den Wechselstromeffekt als eine Folge des Gleich-richtereffektes an und kommt zu dem weiteren Schluß: „Aus der Tat-sache, daß Belichtung den Wechselstromeffekt schwächen bzw. ganz zum Verschwinden bringen kann, folgt ohne weiters, daß es sich bei der Einwirkung von Licht bzw. Wechselstrom auf das Selen nicht um gleichartige Vorgänge handeln kann, wie Greinacher aus seinen Versuchen geschlossen hat."

Zusammenfassend läßt sich aus den bisherigen Beobachtungen folgendes feststellen:

1) Bei gewissen Selenzellen kann der Widerstand durch Wechselstrom geeigneter Stärke erheblich vergrößert werden.

2) Bei manchen Selenzellen zeigen sich Unterschiede des Gleich-strom- und Wechselstromwiderstandes, bei anderen dagegen nicht.

3) Beim Durchgang von Wechselstrom wird an Selenzellen eine mehr oder weniger starke Gleichrichtung beobachtet, die z. T. nur bei bestimmtem Verlauf der Wechselstromkurve auftritt.

4) Bei gleichzeitigem Gleichstrom und Wechselstrom wird eine Vergrößerung des Gleichstromes wahrgenommen.

Diese Erscheinungen haben bis auf die unter 1) genannte eine unzulängliche oder gar keine Deutung erfahren.

Da sich die bisherigen Beobachtungen nur auf Selenzellen beziehen, die z. T. erhebliche Anomalien besitzen, erschien es wünschenswert, die Untersuchungen auch auf einheitliche Kristalle auszudehnen. Bei Untersuchungen an derartigem einheitlichem Material macht man sich frei von Unsicherheiten, die etwa durch Verunreinigungen, Inhomogeni-täten des Kristallgefüges, innere Spannungen u. s. w. bei Selenzellen, wie sie durch Auskristallisieren aus dem Schmelzfluß oder durch Erhitzen eines amorphen Gemisches gewonnen werden, in nicht zu übersehender

Weise vorhanden sein können. Die Ergebnisse der Arbeiten von F. C. Brown (11), der als erster zu seinen Untersuchungen isolierte Kristalle metallischen Selens benutzte, zeigen diesen Vorteil deutlich.

§ 4. Die Herstellung der Selenkristalle.

Die Herstellung einheitlicher Selenkristalle geschah nach einem Verfahren, wie es zuerst von F. C. Brown (11) angegeben ist. Benutzt wird dabei die Eigenschaft des Selendampfes, bei der Abkühlung in einzelnen Kristallen zu sublimieren.

Nach einigen Vorversuchen wurde für die Herstellung der Selenkristalle folgende Anordnung gewählt: Etwa 10 g amorphes Selen (Merk's gereinigtes Selen) wurden in das untere Ende eines Glasrohres von 27 mm lichter Weite und etwa 40 cm Länge gebracht. Dann wurde das Rohr mittels einer Hochvakuumpumpe auf weniger als 1/1000 mm Hg evacuiert, abgeschmolzen und aufrecht in einen elektrischen Ofen gesetzt. Dieser besteht aus einem unten abgeschlossenen Tonzylinder von 24 cm Länge, auf den eine Widerstandsspule von etwa 300 Ohm (Konstantandraht) aufgewickelt ist, der außen zum Wärmeschutz mit Asbest umhüllt ist (als Bindemittel bewährte sich eine Lösung von Wasserglas vermischt mit Kaolin und Magnesia). Der Ofen umschließt das Glasrohr dicht und läßt nur soviel Raum, daß seitlich ein Thermoelement eingeführt werden kann, um die Temperatur des verdampfenden Selens zu messen. Das ganze wurde zum Schutz gegen Temperaturschwankungen der Umgebung in einen großen Kasten eingeschlossen. Der Ofen wurde dann unter Vorschaltung eines Regulierwiderstandes durch Anschluß an die Städtische Spannung (220 Volt) mit etwa 0,405 Amp. geheizt. Dem entsprach eine Temperatur im unteren Teil des Ofens von durchschnittlich 350 C. Da die Netzspannung im Laufe des Tages (besonders in den Abend- und Morgenstunden) oft erheblich schwankte (bis 10 %), war auch die Ofentemperatur nicht konstant (Maximalunterschied 30 %). Der Ofen wurde 100 Stunden lang geheizt. Die Sublimation zeigte folgendes Ergebnis: Von dem amorphen Selen war etwa ein Viertel (2,5 g) verdampft und hatte sich als metallisches Selen auf einer Breite von 3 cm dicht unterhalb des offenen Endes des Ofens (wo das größte Temperaturgefälle herrscht) an der inneren Glaswand des Rohres abgesetzt. Zu unterst hatte sich ein dichter Kranz von nadelförmigen Kristallen gebildet, die teilweise isoliert, teilweise aber auch zu baumartigen Gruppen verwachsen waren. Meistens gingen mehrere Kristalle von einem Ansatzpunkt aus. Die getrennten Kristalle zeigten glatte,

stark reflektierende Flächen von hellgrauem Glanz. Bei gut ausgebildeten Kristallen waren es sechs, meist aber weniger. Die Länge der Kristalle betrug bis zu 10 mm, bei einer Dicke von 0,2 mm. An einzelnen Stellen befand sich das Selen in dicken glänzenden Tropfen zwischen den Kristallen (offenbar, weil das Selen wegen der hohen Temperatur vorübergehend zu stark verdampft war). Weiter oberhalb im Rohr waren die Kristalle kleiner und gingen in einen hellglänzenden metallischen Überzug über. Etwas außerhalb des Ofens hatte sich eine geringe Menge amorphen roten Selens niedergeschlagen.

Um die Schwankungen der Netzspannungen abzufangen, wurde bei den folgenden Sublimationen in Serie mit der Widerstandsspule des Ofens ein Ballastwiderstand (Eisendraht in Wasserstoffatmosphäre) geschaltet, dessen Charakteristik so gewählt wurde, daß sie bei etwa 0,39 Amp. einen steilen Anstieg aufwies. Dies wurde dadurch erreicht, daß die Glasbirne, in der sich die Eisenspirale befand, an eine Hochvakuumpumpe angeschlossen, vollständig evakuiert und dann mittels eines Dreiwegehahnes mit reinem Wasserstoff gefüllt wurde. Die Eisenspirale wurde nun geheizt, während gleichzeitig der Wasserstoff solange abgesogen wurde, bis die Spirale anfing, bei 0,39 Amp. schwach zu glühen. Es gelang auf diese Weise die maximalen Schwankungen des Heizstromes auf etwa 2% herabzudrücken. (Maximalschwankungen der Ofentemperatur ± 3°).

Bei der zweiten Sublimation betrug die Heizstromstärke im Mittel 0,389 Amp., die Ofentemperatur durchschnittlich 343° C. Die Sublimation wurde diesmal nach 80 Stunden unterbrochen. Es hatten sich wieder nadelförmige Kristalle in großer Zahl gebildet, und zwar waren Verwachsungen kaum aufgetreten. Doch hatten die Kristalle offenbar wegen der kürzeren Sublimationsdauer eine geringere Größe. Die Länge betrug im Maximum nur 4 mm, die meisten waren kleiner. Einige von ihnen konnten zu Untersuchungen benutzt werden.

Bei der dritten Sublimation wurde die Heizstromstärke noch niedriger gewählt (0,383 Amp.), Ofentemperatur 330° C. Diesmal hatten sich vorwiegend lamellenförmige Kristalle gebildet. Es waren meist sehr flache Kristalle von rhombischer Gestalt, die häufig eine Querstreifung erkennen ließen. Ihre Länge betrug 4—6 mm, ihre Breite 2—4 mm, die Dicke bis 0,3 mm. Im auffallenden Licht sehen sie etwas dunkler aus, als die nadelförmigen Kristalle der ersten Sublimationen. Einige von ihnen zeigten in durchgehendem Licht eine rote Färbung (Kristall III,2 besonders schön). Die Kristallform ist wohl identisch mit der von Brown beschriebenen (die er als zum fünften System gehörig

identifiziert hat); während die nadelförmigen Kristalle den Brownschen hexagonalen entsprechen. Bei der dritten Sublimation hatten sich auch einige silberglänzende, leichte, biegsame Blättchen gebildet, von lanzettförmiger Gestalt, die aber wegen ihrer geringen Dicke und ihrer Zerbrechlichkeit für elektrische Untersuchungen nicht in Frage kamen.

Es wurde noch eine vierte Sublimation bei einer Heizstromstärke von 0,395 Amp. (dem günstigsten Bereich des Ballastwiderstandes, um die Temperatur möglichst konstant zu halten) unternommen (Ofentemperatur 345° C). Unglücklicherweise schmolz der Ballastwiderstand nach etwa 60 Stunden durch (wohl infolge momentan zu hoher Netzspannung). Es waren lauter gleichartige Kristalle entstanden, die aber wenig ausgebildet waren und keine eindeutig bestimmbare Gestalt zeigten. Für elektrische Untersuchungen kamen sie nicht in Frage.

Die Sublimationen wurden nicht fortgesetzt, da genügend Kristallmaterial für die ins Auge gefaßten Untersuchungen gewonnen war.

§ 5. Vorversuche.

Um die Kristalle für elektrische Messungen zu benutzen, wurden sie in eine Kontaktvorrichtung gebracht, die in verschiedener Form gewählt wurde, um die Kristalle entweder an beiden Enden (Fig. 1) oder flach (Fig. 2) zwischen die Elektroden einzuklemmen. Die Elektroden bestanden aus versilberten Messingstreifen M, die sich mittels Schräubchen S mit federndem Druck gegen ebenfalls versilberte Messingklötzchen K pressen ließen. Die Klötzchen waren auf einer Hartgummiunterlage H verschiebbar befestigt. Um den Kontakt zwischen Kristall Kr und Elektrode möglichst sicher zu stellen und die Kristalle nicht durch Druck zu verletzen, wurde der Kristall beiderseits zwischen Zinnfolie Z von einigen Zehntel mm gebracht.

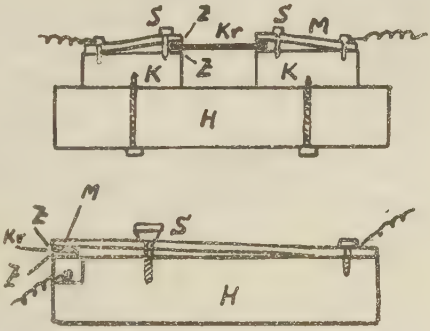


Fig. 1 und 2.

Da der Widerstand der Selenkristalle in der Anordnung der Fig. 1 wegen des geringen Leitungsquerschnittes sehr hoch war und je nach Länge der Kristalle 10^7 Ohm und mehr betrug, es aber für die späteren Messungen (wegen der Vergleichwiderstände) wünschenswert war

Kristalle mit niedrigem Widerstand zu verwenden, wurden für die meisten Messungen flache Lamellenkristalle in der Anordnung der Fig. 2 benutzt. Auf diese Weise wurden Widerstände von der Größenordnung 10^5 Ohm erreicht. Es wiesen die Nadelkristalle und Lamellenkristalle, soweit sich bei der verschiedenen Form und Größe ein Vergleich ermöglichen ließ, dasselbe elektrische Verhalten auf.

Es zeigte sich, daß sich der Widerstand der Kristalle in der Anordnung der Fig. 2 durch Anziehen der Schrauben in verhältnismäßig weite Grenzen ändern ließ. So konnte die Leitfähigkeit leicht auf das Dreifache gesteigert werden. Schon F. C. Brown (11) hat die Beobachtung gemacht, daß die Leitfähigkeit von Selenkristallen durch entsprechenden Druck auf das Hundertfache, ja sogar Millionenfache erhöht werden kann.

Man hätte also durch Anwendung eines stärkeren Druckes die Möglichkeit gehabt, den Widerstand noch weiter herabzusetzen, was in Anbetracht der Vergleichswiderstände (die höchstens bis 10^5 Ohm reichten) von Vorteil gewesen wäre. Doch wird durch Herabsetzen des Widerstandes gleichzeitig der Spannungseffekt, auf den es bei den späteren Messungen ankommt, in seiner relativen Größe beträchtlich verringert (12). Die Kristalle wurden deshalb nur unter mäßigen Druck gesetzt. Es wurde die Beobachtung gemacht, daß die Leitfähigkeit eines Kristalles, wenn er in die Kontaktvorrichtung gespannt war, erst schnell, dann langsam zunahm. Die einem bestimmten Druck entsprechende Leitfähigkeit stellte sich also unter Trägheitserscheinungen ein. Tabelle 1 enthält die Ergebnisse einer solchen Meßreihe. Zugleich

Tabelle 1.

Kristall 1,2 Konstante Spannung 1,0 Volt

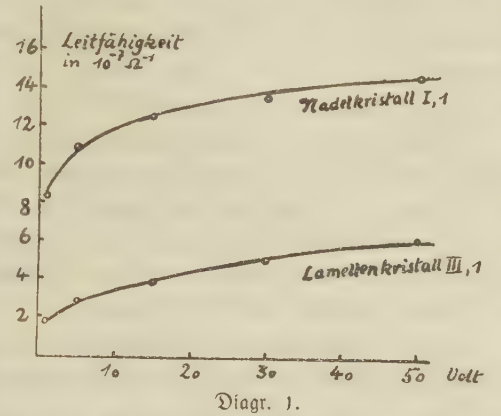
Zeit	Strom
5'	1,20 10^{-6} Amp.
30'	1,29
2h	1,38
1d	1,53
2d	1,56

traten auch häufig kurz nach dem Einspannen bei Anlegen einer konstanten E. M. K. kleine unregelmäßige Schwankungen des Stromes auf, die aber meist nach einiger Zeit verschwanden. Es wurden deshalb die eigentlichen Messungen am Selen erst nach einigen Tagen vorgenommen.

Um das Verhalten der Selenkristalle gegenüber Wechselstrom zunächst qualitativ zu übersehen, wurden einige orientierende Messungen

mit Gleichstrom und Wechselstrom ausgeführt. Die genauere Beschreibung der Versuchsanordnung erfolgt noch an späterer Stelle. Es wurde zunächst folgendes festgestellt:

1) Die Leitfähigkeit der Selenkristalle nimmt mit wachsender Spannung erst schneller dann langsamer zu. Siehe Diagramm 1, das die Leitfähigkeit von einem Nadelkristall und einem Lamellenkristall nach 2' Stromdurchgang wiedergibt. Bei höheren Spannungen (etwa von 50 Volt ab) tritt bei längerem Stromdurchgang eine unregelmäßige, sprunghafte Erhöhung des Stromes ein. Diese Schwankungen sind wohl



Diagr. 1.

auf eine thermische Wirkung des Stromes zurückzuführen. Z. B. stieg bei einem Kristall, der versuchsweise längere Zeit mit 120 Volt belastet wurde, der Strom plötzlich auf das Zwei- bis Dreifache. Die Stromzuführung erfolgte hier nur auf einer Fläche des Kristalls, sodaß der Strom in einer dünnen Oberflächenschicht verlief. Bei mikroskopischer Untersuchung nach dem Stromdurchgang zeigten sich auf dieser Fläche des Kristalls an mehreren Stellen kleine, platte Tröpfchen. Offenbar war der Kristall durch die lokale Wirkung der Stromwärme an der Oberfläche dort zum Schmelzen gebracht. Aus diesen Gründen wurde bei den späteren Versuchen nur mit verhältnismäßig niedrigen Spannungen (meist nur bis 10 Volt) gearbeitet und als Kontaktvorrichtung die Anordnung der Fig. 2 gewählt, bei der der Strom den ganzen Kristall gleichmäßig durchsetzt.

2) Wurde ein Kristall mit Wechselstrom behandelt, so war danach keine meßbare Veränderung des Gleichstromwiderstandes festzustellen. Die Wechselspannungen, die von der Frankeschen Maschine (siehe spätere Beschreibung) geliefert wurden, waren von der Größenordnung der Gleichspannungen.

3) Auch der Wechselstromwiderstand (gemessen mit der Frankeschen Maschine) nimmt mit wachsender Wechselspannung ab. Der Wechselstromwiderstand war meist um einige $^0/_0$ kleiner als der Gleichstromwiderstand. Bei einigen Kristallen konnte kein Unterschied festgestellt

werden. Strom und Spannung zeigten bei einigen Kristallen eine kleine Phasendifferenz. Bei den ersten Versuchen wurden nicht unerhebliche Phasenverschiebungen beobachtet. Wie sich herausstellte, lag dies an den Vergleichswiderständen (Stöpselwiderstände von Hartmann und Braun von 10^5 Ohm), die merkliche kapazitive Phasenwinkel aufwiesen (etwa 15° bei 1000 Perioden!). Es wurde deshalb für alle späteren Versuche ein Präzisionswiderstand von O. Wolff, Berlin (in Dekadensätzen bis 10^5 Ohm) benutzt, der praktisch als induktions- und kapazitätsfrei angesehen werden konnte.

4. Wie bei der Wechselstromabgleichung (mittels Telephon) festgestellt wurde, traten beim Tonminimum häufig schwache Obertöne auf, trotzdem die Maschine eine sinusförmige Spannung liefert. Wurde der Selenwiderstand durch einen gewöhnlichen Widerstand ersetzt, so waren diese Obertöne nicht zu hören. Durch den Selenkristall erfährt der Strom offenbar eine Verzerrung.

Diese Beobachtungen an Selenkristallen bestätigen einen Teil der eingangs aufgezählten Versuchsergebnisse älterer Forscher an Selenzellen.

Da es sich also offenbar um Erscheinungen handelt, die dem Selen selbst zuzusprechen sind und nicht durch zufällige Nebenumstände bedingt sind, liegt es nahe hierfür eben diejenigen Eigenschaften des Selens verantwortlich zu machen, durch die es sich von gewöhnlichen Leitern, an denen diese Erscheinungen nicht beobachtet werden, unterscheidet.

Die folgenden Untersuchungen befassen sich damit, diesen Zusammenhang klar zu stellen.

§ 6. Spannungseffekt und Dunkelträgheit.

1. Um das Verhalten des Selens gegenüber Wechselstrom zu verstehen, gehen wir von der Erscheinung des Spannungseffektes und der Dunkelträgheit aus. Wie schon bei den Vorversuchen erwähnt wurde (Diagramm 1), besitzen die untersuchten Selenkristalle keinen konstanten von der Spannung unabhängigen Widerstand, vielmehr steigt mit wachsender Spannung der Strom stärker an als dem Ohmschen Gesetz entspricht. Die Leitfähigkeit des Selens, die wir im folgenden der Betrachtung zugrunde legen wollen, nimmt also mit wachsender Spannung zu und zwar zuerst schneller, dann langsamer. Diagramm 2a gibt die Abhängigkeit der Leitfähigkeit zweier Lamellenkristalle von der angelegten Spannung wieder. Die Größe des Spannungseffektes innerhalb desselben Spannungsintervalles ist sehr verschieden. Bei

Kristall III, 12 beträgt der Zuwachs der Leitfähigkeit zwischen 1 Volt und 10 Volt 50%, bei Kristall III, 15 dagegen 150%. Berücksichtigt man aber, daß im ersten Fall die Elektrodenfläche wesentlich größer ist (bei etwa gleichem Elektrodenabstand, also gleicher elektrischer Feldstärke) und infolgedessen auch der Strom einen entsprechend größeren Wert hat, so fallen diese Unterschiede fort. Trägt man nämlich die Leitfähigkeit als Funktion der Stromstärke auf, so zeigen die Leitfähigkeitskurven einen ähnlichen Verlauf. Wie Diagramm 2b zeigt, beträgt der Leitfähigkeitszuwachs zwischen 20 und 80 (10^{-6} A) bei Kristall III, 12 etwa 27 %, bei Kristall III, 15 etwa 29%, hat also in beiden Fällen ziemlich die gleiche Größe. So lassen sich auch die Unterschiede verstehen, die man bei Selenzellen bezüglich der Größe des Spannungseffektes beobachtet hat. Z. B. findet Pochettino (4), daß die Zellen (gleicher Herstellungsweise) mit hohem Widerstand einen größeren Spannungseffekt zeigen, als die Zellen mit niedrigem Widerstand (bei dem gleichen Spannungsbereich). Bezieht man die Widerstandswerte, die Pochettino angibt (l. c. Seite 308), auf gleiche Ströme, so fallen die Unterschiede im Spannungseffekt fort.

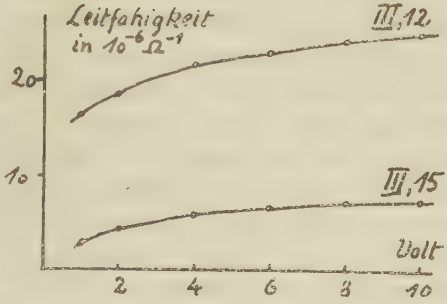


Diagramm 2a

Diagramm 2b

Will man den Spannungseffekt sehr ausgeprägt erhalten, wie es für die weiteren Untersuchungen wünschenswert war, so hat man möglichst kleine Stromstärken zu benutzen, also Kristalle mit hohem Widerstand bei niedrigen Spannungen zu untersuchen. Deshalb wurden einerseits Kristalle mit einem Widerstand in der Größenordnung 10^5 Ohm ausgewählt, andererseits die Spannungen in der Größenordnung von einigen Volt gehalten. Weiter mit der Spangunn

herunterzugehen, war nicht ratsam, da sich sonst bei den Wechselstrommessungen Kontaktpotentiale und Thermokräfte unliebsam bemerkbar gemacht hätten.

II. Die Elektrizitätsleitung im Selen ist noch durch eine weitere Eigentümlichkeit charakterisiert, die für das Verhalten des Selens gegenüber Wechselstrom ebenfalls einen entscheidende Rolle spielt. Es ist dies die sogenannte Dunkelträgheit, die von Ries (Das Selen, S. 78) beschrieben wird. Man beobachtet beim Anlegen einer konstanten Spannung an das Selen, daß sich der Strom zeitlich ausbildet und asymptotisch einem gewissen Grenzwert zustrebt. Die einer bestimmten Spannung entsprechende Leitfähigkeit stellt sich also unter Trägheitserscheinungen ein. Ebenso nimmt die Leitfähigkeit bei Verringerung der Spannung nicht momentan den der verringerten Spannung entsprechenden Wert an. Wir können also ein Anklingen (bei Vergrößern der Spannung) und ein Abklingen (bei Verkleinern der Spannung) des Stromes bezw. der Leitfähigkeit unterscheiden.

Die genauere Untersuchung dieser Erscheinung an einzelnen Selenkristallen ergibt nun folgendes:

a) Das Anklingen erfolgt um so langsamer, je höher die angelegte Spannung ist. Siehe Tabelle 2.

Tabelle 2.

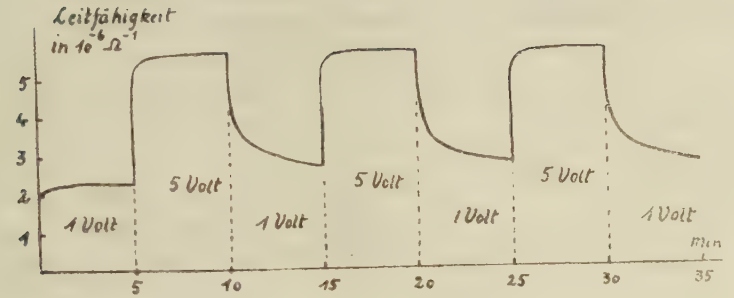
Kristall III, 12. Leitfähigkeit in $10^{6}\,\Omega^{-1}$ nach:

Volt	15"	30"	1'	2'
1	16.17	16.28	16.34	16.38
2	18.29	18.41	18.54	18.62
4	21.3	21.5	21.7	21.8
6	22.6	22.9	23.1	23.2
8	23.7	23.9	24.1	24.2
10	24.4	24.6	24.9	25.0

b) Das Anklingen erfolgt schneller als das Abklingen. Siehe Diagramm 3 und 4.

c) Das Abklingen erfolgt umso langsamer je größer der Spannungsunterschied ist (Diagr. 3a und b) und je länger die höhere Spannung angelegen hat. (Diagr. 4a und b.)

Die Messungen wurden in der aus Fig. 3 ersichtlichen Anordnung ausgeführt. B_1 und B_2 sind zwei Akkumulatorenbatterien mit Potentiometerschaltung, die mit Hilfe der Wippe W abwechselnd in den aus



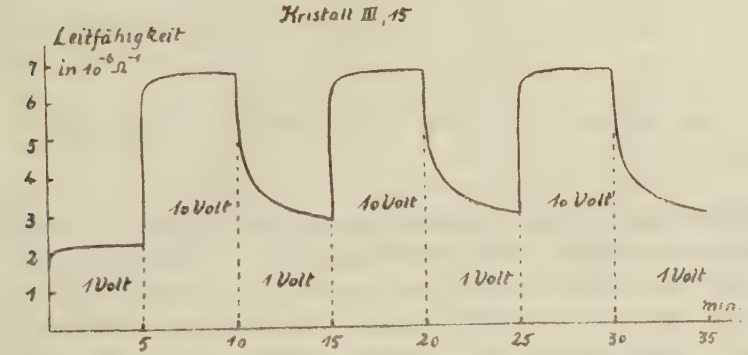


Diagramm 3b und 3a

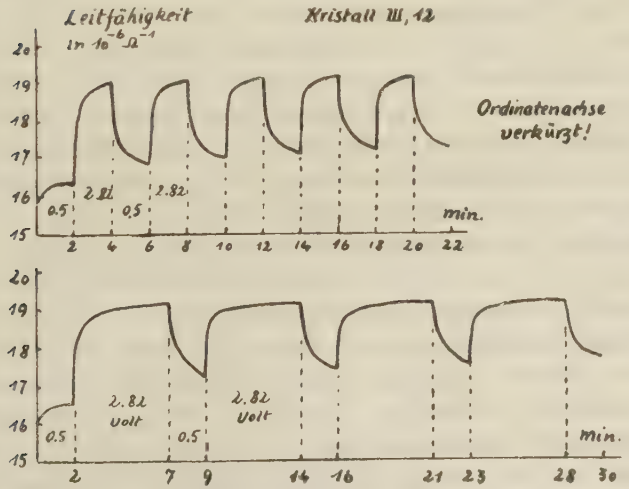


Diagramm 4a und 4b

Kristall und Galvanometer bestehenden Stromkreis eingeschaltet werden konnten. Das Galvanometer (Drehspulinstrument von Hartmann und Braun) hatte eine Empfindlichkeit von $0.988 \cdot 10^{-9}$ Amp. (bei einem Skalenabstand von 459 cm) und war mit Universalshunt und Dämpfungsspule versehen. Die Schwingungsdauer betrug etwa 10 Sek., sodaß die Ablesungen bei aperiodischer Dämpfung erst nach etwa 15 Sek. erfolgen konnten.

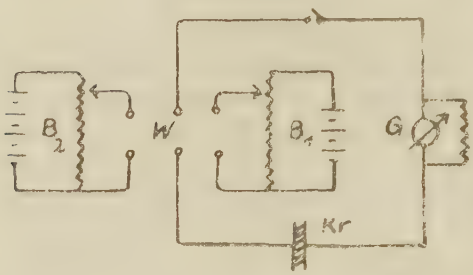


Fig. 3

Im einzelnen ist zu den Meßergebnissen noch folgendes zu bemerken:

1. Wie die Diagramme zeigen (besonders deutlich 4a), stimmen die Abklingungskurven bei einem regelmäßigen Wechsel von hoher und niederer Spannung nicht vollständig überein, sondern das Abklingen erfolgt bei den späteren Wechseln immer etwas langsamer. Die Kurven nähern sich erst schnell dann langsam einer Grenzform. In Diagramm 4a ist dieser Zustand nach etwa 5 Wechseln erreicht. Es macht sich also der Einfluß der vorhergehenden Spannungsänderungen bei den späteren noch geltend, wir haben es mit einer Art Nachwirkung zu tun. Die „Vorgeschichte" des Selens spielt also auch hier wie beim Lichteffekt eine Rolle. Diese Tatsache erschwert die Messungen am Selen ungemein und macht es eigentlich unmöglich, eine Messung zu reproduzieren oder mit einer anderen zu vergleichen, da der ursprüngliche Zustand selbst bei Herstellung aller äußerer Parameter (Temperatur, Druck, Spannung) eben infolge der Trägheitserscheinungen genau genommen erst nach unendlich langer Zeit erreicht wird.

2) Die Anklingungs- und Abklingungskurven weisen bei Kristall III, 12 scheinbar eine größere Trägheit auf. Bezieht man aber auch hier, ebenso wie vorher beim Spannungseffekt, die Kurven nicht auf die Spannung, sondern auf den Strom, so zeigen sie ebenfalls einen ähnlichen Verlauf. Es wäre deshalb richtiger von Stromeffekt und Stromträgheit zu sprechen. Daß hier den Messungen immer die Spannung als unabhängige Variable zugrunde gelegt ist, ist deshalb geschehen, weil es wegen der eben dargelegten Dunkelträgheit meßtechnisch wesentlich einfacher ist, eine konstante Spannung (mit Hilfe

von Akkumulatorenbatterien) anzulegen und die Stromänderungen zu beobachten, als etwa umgekehrt den Strom durch Regulierwiderstände konstant zu halten und die Spannungsänderungen zu messen.

III. Bei einigen Kristallen nahm bei Anlegen einer Spannung der Strom nicht in der eben geschilderten Weise zu, sondern zeigte einen leichten zeitlichen Rückgang. Tabelle 3 gibt die Beobachtungen

Tabelle 3

Kristall IV, 1. Leitfähigkeit in $10^{-7}\,\Omega^{-1}$ nach:

Volt	5"	15"	30"	60"
1	1.71	1.70	1.69	1.68
2	1.88	1.88	1.87	1.85
4	2.07	2.05	2.04	2.03
6	2.13	2.12	2.10	2.09
8	2.18	2.15	2.14	2.11
10	2.26	2.23	2.21	2.18

an Kristall IV, 1 für verschiedene Spannungen wieder. Benutzt wurde für diese Messungen ein Galvanometer mit einer Schwingungsdauer von nur 4 Sek., um die Ausbildung des Stromes schon in den ersten Sek. verfolgen zu können.

Dies Verhalten ist auch häufig an Selenzellen festgestellt, besonders ausgeprägt bei den sogenannten anomalen Zellen (siehe: Ries, Das Selen, S. 32 u. 148) und ist, wie durch die eingehenden Untersuchungen von Chr. Ries bewiesen ist, auf einen Feuchtigkeitsgehalt der Zellen zurückzuführen.

Es handelt sich auch bei diesem anomalen Verhalten der Selenkristalle um einen Einfluß der Luftfeuchtigkeit, die bei Stromdurchgang eine geringe Polarisation und damit einen zeitlichen Rückgang des Stromes zur Folge hat. Dies geht aus folgendem hervor:

1. Es ließ sich bei diesem Kristall ein wenn auch sehr geringer Polarisationsstrom feststellen (einige mm Ausschlag bei höchster Empfindlichkeit des Galvanometers).

2. Als der Kristall in einen Vakuumexsikator gebracht wurde, in dem sich ein Trockenmittel (P_2O_5) befand, zeigte der Kristall nach einiger Zeit ein normales Verhalten (Zunahme des Stromes bei Stromdurchgang).

Daß es sich um Polarisation handelt, wird auch durch die weiter unten beschriebenen Wechselstromuntersuchungen bestätigt. Auffällig bleibt immerhin, daß diese Erscheinung nur an wenigen Kristallen be-

obachtet wurde. Es ist danach anzunehmen, daß es sich nicht so sehr um Feuchtigkeitshäutchen handelt, die an der freien Oberfläche des Kristalls adsorbiert sind (wie es bei den Selenzellen wohl anzunehmen ist), sondern um Feuchtigkeit, die sich beim Einbringen des Kristalls zufällig an den Elektroden befand.

Ein besonderes Verhalten zeigte in dieser Hinsicht Kristal III, 15. Während bei Stromdurchgang in der einen Richtung eine Stromzunahme stattfand, zeigte sich in der umgekehrten Richtung eine Stromabnahme. Tabelle 4 (Diagr. 5a) gibt das zugehörige Zahlenmaterial.

Tabelle 4.

Leitfähigkeit in $10^{-6}\,\Omega^{-1}$ nach:

Volt	15"	30"	1'	2'
+ 1	2.95	2.82	2.63	2.44
2	3.61	3.51	3.40	3.23
4	4.45	4.40	4.30	4.15
6	4.91	4.87	4.81	4.76
8	5.19	5.17	5.18	5.19
10	5.41	5.42	5.44	5.49
− 1	1.80	1.82	1.86	1.88
2	3.32	3.39	3.46	3.51
4	4.98	5.03	5.08	5.15
6	5.63	5.72	5.78	5.82
8	6.14	6.21	6.28	6.36
10	6.49	6.57	6.63	6.69

Es tritt also hier Polarisation vorwiegend nur in einer Richtung auf. In der willkürlich als positiv bezeichneten Richtung nimmt der Strom bezw. die Leitfähigkeit bei niederen Spannungen ab, dagegen von 8 Volt ab zeitlich zu. Wir haben es mit der Überlagerung von Polarisation und Dunkelträgheit zu tun. Während bei niederen Spannungen die Polarisation überwiegt und eine Abnahme des Stromes zur Folge hat, macht sich bei höheren Spannungen die größere Dunkelträgheit geltend.

Der Kristall wurde dann in den Exsikator gebracht. Nach 10 Stunden zeigte sich schon ein stärkeres Hervortreten der Dunkelträgheit. Es machen sich zuerst kleine Stromschwankungen bemerkbar (wohl infolge Verdampfens der Feuchtigkeit). Nach 20 Stunden ist die zeitliche Ausbildung des Stromes in beiden Stromrichtungen ziemlich gleich.

Nach 40 Stunden (Tabelle 5, Diagr. 5b) macht sich die Polarisation im Stromanstieg nicht mehr bemerkbar.

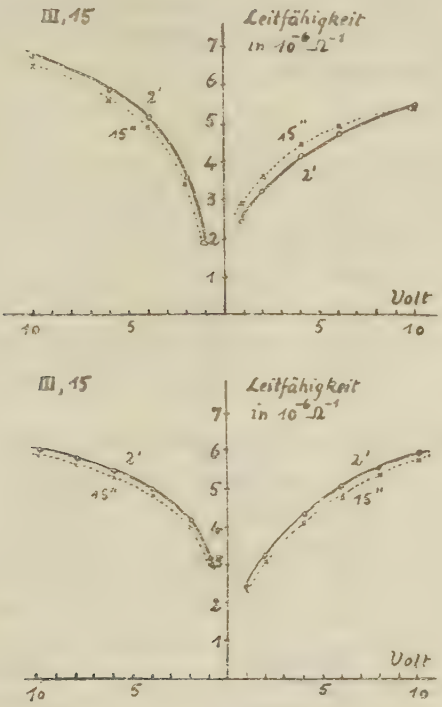


Diagramm 5a und 5b

Tabelle 5.

Kristall III, 15 40h im Exsikator. Leitfähigkeit in $10^{-6}\Omega^{-1}$ nach:

Volt	15"	30"	1'	2'
1	2.35	2.37	2.40	2.40
2	3.24	3.23	3.25	3.25
4	4.18	4.23	4.28	4.35
6	4.79	4.99	5.03	5.06
8	5.46	5.48	5.50	5.53
10	5.81	5.83	5.87	5.95
1	3.10	3.13	3.15	3.16
2	4.03	4.09	4.19	4.15
4	4.82	4.96	4.99	5.01
6	5.36	5.39	5.42	5.43
8	5.68	5.70	5.72	5.74
10	5.90	5.93	5.94	5.95

Tabelle 6 (Diagr. 6) gibt das Verhalten von Kristall III, 16 in beiden Stromrichtungen wieder. Hier nimmt der Strom zeitlich zu, aber nur sehr wenig. Es wird also hier offenbar die Dunkelträgheit durch die geringe Polarisation fast kompensiert. Die späteren Wechselstrommessungen bestätigen dies.

Tabelle 6.

Kristall III, 16. Leitfähigkeit in $10^{-6}\,\Omega^{-1}$ nach:

Volt		15"	30"	1'	2'
+	1	4.02	4.03	4.03	4.02
	2	4.56	4.56	4.57	4.56
	4	5.22	5.24	5.26	5.25
	6	5.43	5.44	5.45	5.45
	8	5.66	5.71	5.71	5.71
	10	5.88	5.89	5.90	5.90
—	1	3.01	3.03	3.05	3.05
	2	3.56	3.58	3.57	3.57
	4	4.10	4.12	4.13	4.13
	6	4.46	4.47	4.48	4.49
	8	4.71	4.72	4.73	4.74
	10	4.91	4.93	4.94	4.96

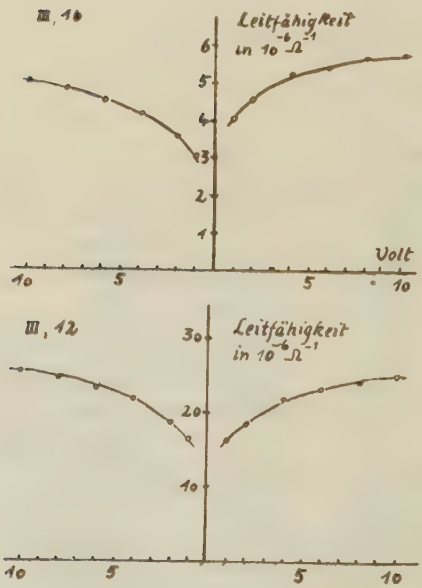


Diagramm 6 und 7

Dadurch, daß die Polarisation in beiden Richtungen verschieden ist, haben die Leitfähigkeitskurven in der positiven und negativen Richtung ebenfalls verschiedenen Verlauf. Es ist also notwendig, beide Stromrichtungen zu berücksichtigen. Diagramm 5a zeigt die Leitfähigkeitskurve des Kristalls III, 15. Die gestrichelte Kurve gibt die Leitfähigkeit nach 15' an, die ausgezogene Kurve nach 2'. Man sieht also, daß die Leitfähigkeitsunterschiede in beiden Richtungen

mit dem Stromdurchgang zunehmen. Eine ähnliche Beobachtung hat auch Greinacher (7) bei der Untersuchung des Dunkelwiderstandes bei Selenzellen gemacht. Auch bei diesen Zellen wuchs der Widerstandsunterschied mit der Zeit des Stromdurchganges. Greinacher schließt aus den Untersuchungen an verschiedenen Zellen, daß es sich hierbei teils um Polarisation, teils um eine wahre Widerstandsänderung durch den Strom handelt.

Kristall III, 12, an dem keine Polarisation nachzuweisen war, zeigt wie aus Diagramm 7 zu ersehen ist, in beiden Stromrichtungen fast genau den gleichen Verlauf der Leitfähigkeit, wodurch die obige Ansicht über die Polarisation als wesentliche Ursache der Leitfähigkeitsunterschiede gestützt wird. Daß daneben noch eine andere Ursache für die Widerstandsverschiedenheiten in Frage kommen kann, wird im Laufe der folgenden Paragraphen behandelt werden.

§ 7. Statisch und dynamische Leitfähigkeitskurve.

Bestimmen wir die Leitfähigkeitskurve, indem wir den Strom bei jeder Spannung stets seinen vollen Wert erreichen lassen (was praktisch nach einigen Minuten eintritt), so erhalten wir die Kurven der soeben beschriebenen Form, die die Abhängigkeit der Leitfähigkeit von der Spannung angeben. Wir wollen diese Kurve die statische Leitfähigkeitskurve nennen, da sie für eine konstante Gleichspannung gilt.

Benutzten wir nun statt des Gleichstromes Wechselstrom, so wird nicht mehr die statische Kurve maßgebend sein. Es ist auf Grund der soeben untersuchten Trägheitserscheinungen zu erwarten, daß bei Zunahme der Wechselspannung (d. h. der Momentanwerte innerhalb einer Periode der Wechselspannung) die Leitfähigkeit des Selens nicht den dieser Zunahme entsprechenden Wert der statischen Kurve erreicht, sondern einen kleineren Wert behält, während umgekehrt bei Abnahme der Spannungswerte die Leitfähigkeit über dem statischen Werte bleibt. Die Wechselstromleitfähigkeitskurve des Selens, die wir die dynamische nennen wollen, wird gegenüber der statischen modifiziert sein.

1. Methode zur Aufnahme der dynamischen Kurve. Um die Verhältnisse näher zu studieren, ist es notwendig, die Form der Wechselstromkurve bei gegebener Spannungskurve aufzunehmen. Hieraus läßt sich dann die dynamische Charakteristik bzw. Leitfähigkeitskurve konstruieren. Derartige Messungen bieten nun bei den Selenkristallen wegen ihres hohen Widerstandes (10^5 bis 10^6 Ohm) einige Schwierigkeiten. Da aus den eingangs erwähnten Gründen keine hohe Spannungen verwandt werden sollten, sind die zu messenden Stromstärken sehr klein.

Von den bekannten Methoden zur Aufnahme von Wechselstromkurven kommen deshalb der Schleifenoszillograph und die Braunsche Röhre (die eine kontinuierliche Aufnahme der Kurven gestatten) nicht in Frage. Es mußte zu der umständlicheren, dafür aber empfindlicheren Methode der punktförmigen Aufnahme der Wechselstromkurve gegriffen werden und zwar in der Joubertschen Anordnung (13). Benutzt wurde dazu die Universalmaschine des Instituts, ein Motor-Generator-Aggregat für Gleichstrom und ein- und mehrphasigen Wechselstrom bis 50 Per sec von Schuckert und Co. Auf der Achse dieser Maschine war eine verstellbare Kontaktscheibe mit genauem Teilkreis angebracht. Da der Wechselstromgenerator vierpolig war, entsprach einer Drehung der Scheibe um 180^0 eine volle Periode des Wechselstromes. Die Frequenz des Wechselstromes konnte durch Regulierwiderstände im Anker- und Feldkreis des Gleichstrommotors von 12 sec bis etwa 50 sec verändert werden. Die Höhe der Wechselspannung wurde durch Erregung des Feldes des Wechselstromgenerators mittels der Lokalbatterieen des Instituts passend eingestellt. Um die Momentanwerte des Stromes u n d der Spannung zu bestimmen, wurde mit der Wechselstromquelle und dem zu untersuchenden Kristall in Serie ein induktionsfreier Widerstand geschaltet. Hierzu diente der schon bei den Vorversuchen benutzte Präzisionswiderstand von O. Wolff, Berlin bis 10^5 Ohm. Dadurch, daß nacheinander die Spannung über dem Selenkristall und dem Ohmschen Widerstande bei derselben Stellung der Kontaktscheibe bestimmt wurde, erhielt man zusammengehörige Werte der Selencharakteristik, denn aus der Größe der Spannung über dem bekannten Widerstand ließ sich sofort die Größe des Stromes angeben. Der Vergleichswiderstand wurde, um die Spannungsabfälle nicht zu verschieden zu machen, möglichst gleich dem Selenwiderstand gewählt (meist 10^5 Ohm). Wegen der Höhe der Widerstände war es nicht möglich, die Spannungsabfälle voltmetrisch zu messen (aus Mangel an genügend hohen und dabei konstanten Vorschaltwiderständen). Es kam deshalb zur Spannungsmessung nur das Elektrometer oder die Compensationsmethode in Frage. Wegen der bequemeren Eichung wurde der letzteren Methode der Vorzug gegeben. Es boten sich aber zunächst in der praktischen Ausführung einige Schwierigkeiten. Mit einem gewöhnlichen Kurbelkompensationsapparat ließ sich eine Kompensation der Spannungen nur sehr mühsam erreichen, da stets kleine unregelmäßige Schwankungen der zu kompensierenden Spannungen vorhanden waren, die das Nullinstrument nie ganz zur Ruhe kommen ließen und eine hinreichend genaue Eingabelung

des Spannungswertes nur unter großem Zeitaufwand gestatteten. Es wurde deshalb zur Kompensation eine einfache Vorrichtung benutzt, wie sie ähnlich de Rosa (13) zur Konstruktion einer automatischen Registrierung von Wechselstromkurven verwandt hat und die sich auch hier als sehr brauchbar erwies: Die Kompensationsspannung wurde mittels eines Gleitkontaktes von einem Widerstande an dem eine konstante E. M. K. lag, abgegriffen. Als Widerstand wurde ein sehr genau gearbeiteter Ruhstratwiderstand gewählt, der bei etwa 500 Ohm etwa 850 dicht aneinanderliegende Windungen aus dünnem Konstantandraht besaß. Die Größe der zur Kompensation benutzten Spannung, die sich leicht und schnell einstellen ließ, war also der Länge des abgegriffenen Wickelungsstückes direkt proportional und ließ sich durch diese messen. Eine an dem Widerstande seitlich angebrachte Millimeterskala gestattete, diese Länge bequem abzulesen. Da die Gesamtlänge des Wicklungsstückes 312 mm und die angelegte Spannung 12,5 Volt betrug, entsprachen also 100 mm der Skala gerade einer Spannung von 4,00 Volt. Die Kompensation konnte auf diese Weise schnell und dabei mit der genügenden Genauigkeit ausgeführt werden, denn die Unsicherheit, die durch die Schwankungen der zu kompensierenden Spannung in der Abgleichung bestand, überwog den möglichen Fehler in der Einstellung und Ablesung am Kompensationswiderstand. Diese Schwankungen rührten im wesentlichen von der Inkonstanz der Wechselspannung her, die trotz sorgfältiger Einstellung der Schleifringe und Bürsten der Maschine nicht ganz zu beseitigen war, da der Motor, der an die Städtische Netzspannung angeschlossen war, nicht ganz konstant lief. Die Unsicherheiten der Übergangswiderstände an der Kontaktscheibe spielen bei dieser Methode keine Rolle. Die Kompensationsspannung ließ sich durchschnittlich bis auf etwa ein mm genau am Kompensationswiderstand bestimmen, eine Genauigkeit, die für die ins Auge gefaßten Untersuchungen ausreichte. Die Unsicherheit in der Bestimmung der Kompensationsspannung betrug dadurch bei kleinen Spannungswerten bis zu einigen $^0/_0$, bei größeren Spannungswerten dagegen weniger als 1 $^0/_0$.

Die für die Aufnahme von Wechselstromdiagrammen an Selenkristallen benutzte Anordnung ist in Fig. 4 skizziert. Die Messungen wurden wie folgt ausgeführt: Etwa $^1/_2$ Stunde vor einer Meßreihe wurde die Dynamomaschine in Gang gesetzt, damit sie sich einlief. Etwa 15' vor der ersten Kompensation wurde der Wechselstromkreis, bestehend aus Wechselstromquelle D, Selenkristalle Kr und Vergleichswiderstand R_1,

eingeschaltet und die Wechselspannung am Voltmeter V abgelesen und die Frequenz der Maschine mittels Tachometer gemessen. Nun wurde der Kompensationskreis bestehend aus Kompensationswiderstand R_2 mit Batterie B und Umschalter U_2, Joubertscher Scheibe J und Galvanometer G und Taster T eingeschaltet und die Joubertsche Scheibe so eingestellt, daß die Spannung über dem Selenkristall Null war. Dann wurde die Joubertsche Scheibe von 5^0 zu 5^0 weitergestellt und für jede Stellung mittels des Umschalters U_1 abwechselnd der Momentanwert der Spannung über Selenkristall Kr und Vergleichswiderstand R_1 kompensiert. Die Aufnahme der Momentanwerte wurde meist über etwas mehr als eine ganze Periode des Wechselstromes erstreckt. Eine einzelne Kompensation ließ sich nach einiger Übung in einer Zeit von etwas weniger als einer Minute ausführen, sodaß die Aufnahme einer ganzen Periode in weniger als einer Stunde durchgeführt werden konnte. Für die Messungen wurden vorwiegend die Abendstunden benutzt, da dann der Motor am ruhigsten lief.

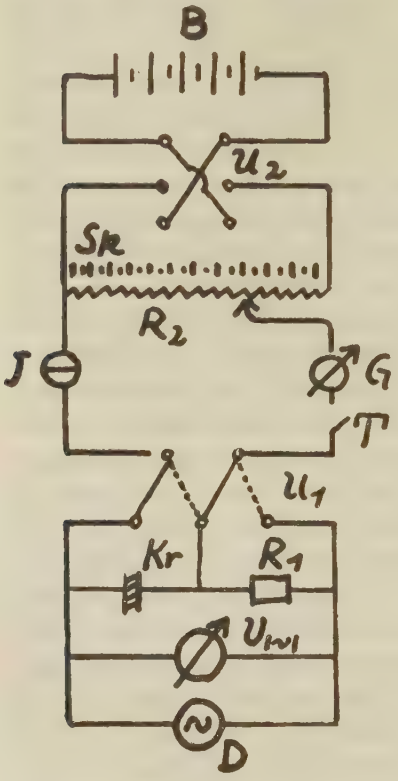


Fig. 4.

Zunächst wurde die Spannungskurve der Maschine aufgenommen. Es ist neben der Grundschwingung die 5te Oberschwingungen schwach angedeutet. Doch ist die Abweichung von der Sinusform so gering, daß sie für die Aufnahme der Wechselstromdiagramme an den Selenkristallen nicht ins Gewicht fällt. Eine vollständige Reinigung der Maschinenspannung wäre zudem nutzlos, weil infolge der Reihenschaltung des Selenkristalls mit einem Ohmschen Widerstande, selbst

wenn die Klemmspannung der Maschine rein sinusförmig ist, die Spannungskurve über dem Selenkristall schwach verzerrt wird. (Siehe § 8.)

2) Vergleich der statischen und dynamischen Leitfähigkeitskurve.

Es wurde nun die Strom-Spannungskurve an den vorhin auf ihren Spannungseffekt hin untersuchten Selenkristallen aufgenommen. Tabelle 7a gibt eine solche Meßreihe an Kristall III,12 wieder.

Tabelle 7a Kristall III,12 $\sqrt{}$ 12/sec **dynamisch**

Grad	e in mm	i in mm	e in Volt	L in $^{-6}\Omega^{-1}$
0	+29	+45.5	+1.17	15.6
10	44.5	72	1.78	16.2
20	57	64	2.28	16.5
30	66	113	2.64	17.1
40	74	127	2.96	17.2
50	81	143	3.24	17.6
60	87.5	154	3.50	17.6
70	90	159	3.60	17.6
80	89	158	3.56	17.7
90	84	149	3.36	17.7
100	79	136	3.16	17.1
110	71	122	2.84	17.1
120	62	105	2.48	16.9
130	58.5	86.5	2.10	16.5
140	39	64	1.56	15.9
150	25	39	1.00	15.6
160	7	10.5	0.28	15.0
170	−12.5	−19	−0.50	15.2
180	29	46	1.16	15.8
190	45	71	1.80	15.8
200	56	90	2.24	16.1
210	64	110	2.56	17.2
220	73	126	2.92	17.3
230	80	140	3.20	17.5
240	87	150	3.48	17.2
250	88.5	157	3.54	17.7
260	88	155	3.52	17.6
270	83	146	3.34	17.5
280	78	134	3.12	17.2
290	70	119	2.84	17.0
300	61	104	2.44	17.0
310	51	85	2.04	16.7
320	39	61.5	1.56	15.8
330	24	36.5	0.96	15.2
340	− 6	− 9	0.24	15.0
350	+12	29	+0.48	15.8
360	28	45	1.12	16.0

Die beiden ersten Spalten der Tabelle geben die Ablesungen am Kompensationswiderstand für Kristall und Vergleichwiderstand (dessen Größe $10^5\,\Omega$ betrug) in mm an.

Es ist zunächst festzustellen, daß der aufsteigende und absteigende Ast der Charakteristik zusammenfallen. Strom und Spannung sind also in Phase. Es ist deshalb angängig auch bei Wechselstrom von einer Leitfähigkeitskurve zu sprechen. Die Punkte dieser dynamischen Kurve werden durch Division der Momentanwerte des Stromes durch die entsprechenden Werte der Spannung gewonnen. In der vierten Spalte der Tabelle 7a finden sich diese Werte in reziproken Ω verzeichnet, während die dritte Spalte die zugehörige Momentanspannung in Volt angibt. Diagramm 8 – 10

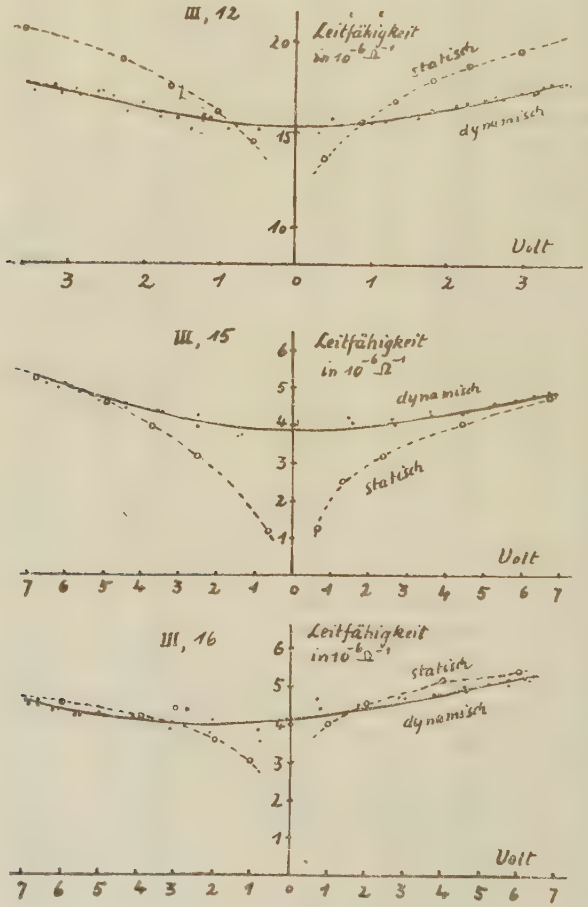


Diagramm 8, 9, 10.

zeigt die graphische Darstellung der so erhaltenen Leitfähigkeitskurven an Kristall III,12, III,15 und III,16. Die Frequenz betrug 12 Per/sec, die Klemmspannung der Maschine etwa 8 Volt eff.

Um einen Vergleich mit den statischen Verhältnissen zu ermöglichen, sind nach jeder Wechselstromaufnahme ebenfalls die statischen Charakteristiken ermittelt, indem statt der Wechselstromquelle eine veränderbare Gleichspannung in den Stromkreis eingeschaltet wurde und die zusammengehörigen Werte der Spannungen über Selenkristall und Vergleichs-

Tabelle 7b

Kristall III,12

statisch

e in mm	i in mm	e in Volt	L in $10^{-6}\Omega^{-1}$
+9.5	+13	+0.38	13.7
15.	22	0.60	14.6
21.5	34	0.86	15.6
32.5	54	1.30	16.6
44.5	77.5	1.78	17.9
57.5	107	2.30	18.6
74	144	2.96	19.2
89.5	180	3.58	19.5
—13	—19	—0.52	14.6
26	42	1.04	16.2
41	72	1.64	17.6
57	108.5	2.28	19.0
73	145	2.92	19.9
90	185.5	3.60	20.5

widerstand durch Kompensation bestimmt wurden, nachdem jedesmal die Spannung 2' angelegen hatte. (Tabelle 7b). Die daraus sich ergebenden Statischen Kurven sind in den Diagrammen gestrichelt eingezeichnet. Wir sehen aus den Diagrammen 8–10 folgendes: Der Verlauf der dynamischen Leitfähigkeitskurve weicht von dem der statischen erheblich ab. Die statische Kurve ist konkav, die dynamische dagegen konvex gegenüber der Spannungsachse. Bei niederen Spannungswerten liegt sie *über* der statischen, bei höheren Werten *unter* z. T. aber auch über der der statischen. Die dynamische Kurve hat annähernd die Form einer Parabel, die symmetrisch zur Stromachse liegt. Dies trifft wenigstens für die Kurven bei Kristall III,12 und III,15 zu. Die Unsymmetrie, die in der *statischen* Kurve bei Kristall III,15 vorhanden

ist, tritt in der dynamischen Kurve nicht auf (Diagr. 9). Dies stützt die Ansicht, daß die Widerstandsverschiedenheit bei Gleichstrom hier im wesentlichen durch galvanische Polarisation hervorgerufen wird, die sich bei Wechselstrom nicht ausbilden kann. Deshalb liegt der positive Ast der dynamischen Kurve über der statischen. Nachdem der Kristall in den Exsiccator zum Trocknen gebracht war, wurden die Kurven der Diagramme 11, 12 und 13 erhalten, die verschiedenen Wechselspannungen

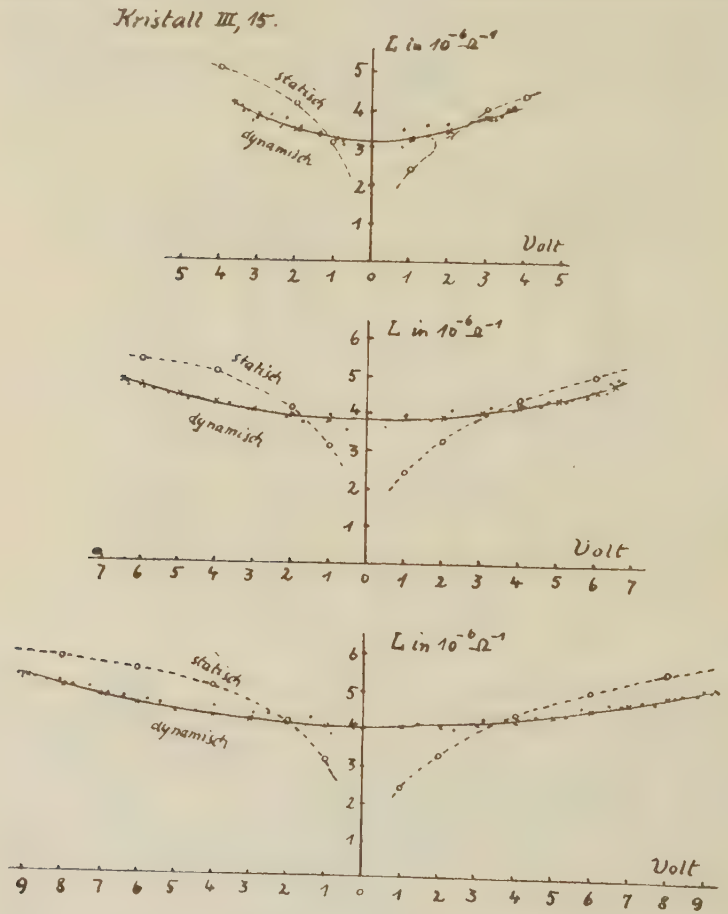


Diagramm 11, 12 und 13.

entsprechen. Die dynamische Charakteristik hat sich nicht geändert. (Vergl. Diagr. 9 und 12, die bei gleichen Spannungen aufgenommen sind). Da infolge der Trocknung die Polarisation zurückgegangen

ist, zeigen statische und dynamische Kurve jetzt dasselbe Bild, wie bei Kristall III,12: In beiden Richtungen liegt die dynamische Kurve bei niederen Momentanwerten der Spannung über der statischen, bei höheren Werten ist es umgekehrt. Der Grund für diese Verschiedenheit der Gleichstrom- und Wechselstromkurven ist in der im vorigen Paragraphen behandelten Dunkelträgheit zu suchen.

3) Spannungsabhängigkeit der Leitfähigkeitskurve.

Da nun die Dunkelträgheit, wie gezeigt war, mit der Höhe der angelegten Spannung zunimmt und gleichzeitig der Spannungseffekt mit wachsender Spannung abnimmt, ist zu erwarten, daß die Form der dynamischen Leitfähigkeitskurve sich mit der Höhe der angelegten Spannung ändert und zwar flacher wird. In der Tat trifft dies zu, wie schon aus den Diagrammen 11, 12 und 13 hervorgeht. Es wurde zu diesen Messungen Kristall III,15 benutzt, da er die größte Änderung der Leitfähigkeit aufweist und deshalb diese Erscheinung am deutlichsten zeigt. Da die Dunkelträgheit auch von der Dauer der angelegten Spannung abhängt, ist zu vermuten, daß auch die Kurvenform der Wechselspannungskurve einen gewissen Einfluß auf die dynamische Charakteristik haben wird. Doch läßt sich dieser Einfluß nicht sicher nachweisen, da die Höhe der Spannung die Gestalt der dynamischen Kurve viel entscheidender beeinflußt.

4) Frequenzabhängigkeit der Leitfähigkeitskurve.

Es wurde nun weiter die Frage untersucht, ob die Frequenz einen Einfluß auf die Form der Charakteristik hat. Zu diesem Zweck wurden die Wechselstromdiagramme bei verschiedenen Tourenzahlen der

Tabelle 8 Kristall III,15

ν=12/sec e_{eff}=12,4 Volt		ν=25/sec e_{eff}=13,1		ν=43/sec e_{eff}=11,7	
e	i	e	i	e	i
— 52	— 26	— 55.5	— 27.5	— 56.5	— 27.5
6	0.5	8	2	12	5
+ 45	+ 25	+ 46	+ 26	+ 38	20.5
87	47	89	49	78	41.5
121	69.5	128	72.5	113	63
150	89	159	95.	142	83
173	107	183.5	113	167	99
193	122	204	129	183	112
210	136	225	145	201	126
224	147	237.5	157	214	136.5
228	150	243.5	160	219	141
224.5	148	237.	157	214	139

Maschine, denen Wechselstromfrequenzen von 12, 25 und 43 Per sec entsprachen, und annähernd gleich hoher Wechselspannung aufgenommen. Wie Tabelle 8 zeigt, fallen die Charakteristiken innerhalb der Genauigkeitsgrenze der Messung zusammen. Es tritt auch bei den höheren Frequenzen keine Phasenverschiebung auf. Die Frequenz hat also innerhalb dieses Gebietes keinen Einfluß auf die Leitfähigkeitskurve. Es wäre natürlich wünschenswert gewesen, die Untersuchungen auf weit höhere Frequenzen auszudehnen. Doch stand keine geeignete Hochfrequenzmaschine zur Verfügung, an der die Messungen nach der Joubertschen Methode vorgenommen werden konnten. Immerhin ist durch die noch zu beschreibenden Frequenzmessungen des Wechselstromwiderstandes und des Gleichrichtereffektes der Schluß erlaubt, daß auch bei höheren Frequenzen die Unabhängigkeit der Leitfähigkeitskurve besteht.

Während die dynamischen Leitfähigkeitskurven an Kristall III,12 und III,15 einen symmetrischen Verlauf in der positiven und negativen Richtung erkennen lassen, ist dies bei Kristall III,16 nicht der Fall. Die dynamische Kurve liegt in beiden Richtungen bei höheren Spannungswerten unter der statischen, aber sowohl dynamische wie statische Kurve liegen in der negativen Richtung tiefer als in der positiven. (Diagr. 10). Da also bei diesem Kristall auch die dynamische Kurve unsymmetrisch ist, haben wir es hier mit einer unipolaren Leitung zu tun, die nicht auf Polarisation beruhen kann.

Über das Zustandekommen dieser unipolaren Leitung haben wir uns wohl dieselbe Vorstellung zu machen, wie sie G. Hoffmann (14) auf Grund seiner Beobachtungen über einen Effekt, den er als Elektronenaustritt aus Metallen unter Wirkung hoher Feldstärken bezeichnet, zur Erklärung der unipolaren Leitungserscheinungen an Kristalldetektoren entwickelt hat. Nehmen wir an, daß in den beiden Übergangsschichten Selenkristall-Elektrode (nur hier haben wir die Ursache zu suchen, da der Kristall selbst homogen ist) irgendwelche Unsymmetrie besteht, sei es daß die Berührungsfläche zwischen Kristall und Zinnfolie auf einer Seite teilweise unvollständig ist, sei es daß eine Verschiedenheit der feinsten Oberflächenstrukturen auf den Elektroden (etwa durch teilweise Oxydation oder irgendwelche zufällige Verunreinigung) vorhanden ist, so ist damit nach Hoffmann die Möglichkeit einer unipolaren Leitung gegeben. Denn Hoffmann hat die interessante Beobachtung gemacht, daß bei genügend hohen Feldstärken Elektronen aus Leitern herausgerissen werden, die nichtleitende Schichten (in unserem Fall die äußerst dünne Schicht zwischen Kristall und Elektrode) zu durchdringen vermögen.

Die kritischen Austrittsspannungen hängen vom Material ab. Besonders hat auch die Oberflächenstruktur einen wesentlichen Einfluß auf den Elektronenaustritt. Damit ist bei irgendwelchen Unsymmetrien und nur teilweisem Kontakt der Elektroden ein bevorzugter Stromdurchgang in einer Richtung verständlich. Daß diese Erscheinung bei den Selenkristallen trotz der ziemlich festanliegenden und auch ziemlich gleichgestalteteten Elektroden zuweilen merklich auftritt, liegt eben an der geringen Leitfähigkeit und der damit verbundenen geringen Stärke des hindurchgehenden Stromes. Übrigens zeigte gerade Kristall III,16 oft kleine unregelmäßige Schwankungen des Stromes, die auf einen nicht ganz vollkommenen Kontakt hindeuten und die obige Erklärung wahrscheinlich machen.

§ 8. Gleichstrom- und Wechselstromleitfähigkeit.

Auf Grund der Form der Leitfähigkeitskurve lassen sich nun eine Reihe von Wechselstromerscheinungen am Selen verstehen.

Zunächst erklärt sich aus der Verschiedenheit der statischen und dynamischen Leitfähigkeitskurve, daß man zu einer verschiedenen Größe der Selenleitfähigkeit gelangt, je nachdem ob man sie mit Gleichstrom oder Wechselstrom bestimmt. Da unter normalen Verhältnissen (wenn keine Polarisation vorhanden ist) bei stark ausgeprägtem Spannungseffekt die dynamische Charakteristik bei höheren Spannungwerten beträchtlich *unter* der statischen liegt, wird die Wechselstromleitfähigkeit *geringer* sein, selbst wenn der *Effektivwert* der Wechselstromspannung gleich dem Gleichspannungswert ist (also der Scheitelwert der Wechselspannung 1.414 mal größer ist). Dabei ist aber noch zu berücksichtigen, daß infolge der gekrümmten Form der Leitfähigkeitskurve die Wechselstromkurve eine Verzerrung erleidet. Es kommt deshalb darauf an, nach welcher Methode der Wechselstromwiderstand bestimmt wird, ob die *Effektivwerte* von Strom und Spannung oder die *Amplituden* von Strom und Spannung ermitteln werden.

Auf die erste Weise hat Luterbacher (6) die Wechselstromleitfähigkeit einer Selenzelle gemessen. Er bestimmte die Effektivwerte des Stromes und der Spannung mittels eines empfindlichen Elektrodynamometers, mußte aber um überhaupt meßbare Werte des Stromes zu erhalten ziemlich hohe Spannungen anwenden. Er fand die Leitfähigkeit der Zelle erheblich kleiner als bei Gleichstrom. Zum Vergleich wollen wir die Wechselstromleitfähigkeit eines *Selenkristalls* aus den Effektivwerten von Strom und Spannung auf Grund der aufge-

nommenen Leitfähigkeitskurven berechnen. Wir benutzen dazu die Leitfähigkeitskurven des Kristalls III,15, bei dem der Spannungseffekt und die Dunkelträgheit ganz ähnlich ausgebildet sind, wie bei der Luterbacherschen Zelle. Die Kurven der Diagramme 11, 12, 13 lassen sich mit guter Annäherung durch eine Parabel zweiten Grades, die symmetrisch zur Stromachse verläuft und gegen die Spannungsachse also in der Form:

(1) $L = a_1 + a_3 e^2$

darstellen.

Den in Diagramm 11, 12, 13 gezeichneten Kurven entsprechen in der Entwicklung (1) die in Tabelle 9 wiedergegebenen Koeffizienten. Die berechneten Leitfähigkeitswerte, die in die Diagramme mit Kreuzen eingetragen sind, fallen mit der gezeichneten Kurve gut zusammen.

Tabelle 9

$$\frac{L\,|=| - L\,|\sim| \cdot 100}{L\,|=|}$$

Diagr	e eff	a_1	a_3	$L\,\|\sim\|$	$L\,\|=\|^{+}$	$L\,\|=\|^{-}$	+	−
11	2.54	3.15	7.3	3.87	3.70	4.47	−4.6	+ 13.4
12	4.6	3.85	2.25	4.57	4.60	5.18	+0.7	+ 11.8
13	6.4	4.00	1.48	4.91	5.17	5.50	+5.0	+ 10.7
	Volt	$\times 10^{-6}$	$\times 10^{-8}$					

Wir wollen nun auf Grund des Ansatzes (1) den Effektivwert des Stromes berechnen, wenn wir an den Kristall eine den Leitfähigkeitskurven entsprechende sinusförmige Wechselspannung anlegen. Da der Kristall mit einem Widerstand in Serie geschaltet war, sind auch die Spannungskurven bei der Aufnahme etwas verzerrt. Wie aber die harmonische Analyse ergibt kann die Spannungskurve praktisch als sinusförmig angesehen werden. Die Scheitelwerte der Spannung sind in den drei Fällen, wie sich aus der Zeichnung ergibt:

3,6 bzw. 6,5 bzw. 9,0 Volt

und die entsprechenden Effektivwerte:

2,54 bzw. 4,6 bzw. 6,4 Volt.

Der Strom ist gegeben durch:

$$i = L \cdot e$$

oder auf Grund von (1):

(2) $$i = a_1 e + a_3 e^3$$

Die Spannung können wir darstellen durch:

$e = e_0 \sin wt$, wo e_0 den oben angegebenen Scheitelwert bezeichnet.

Der Strom läßt sich also darstellen durch:

(3) $$i = a_1 e_0 \sin wt + a_3 e_0 \sin^3 wt$$

Dafür können wir schreiben:

(4) $$i = (a_1 e_0 + \frac{3}{4} a_3 e_0^3) \sin wt - \frac{a_3}{4} e_0^3 \sin 3\,wt.$$

Der Strom enthält also neben der Grundschwingung noch die 3. Oberschwingung.

Der quadratische Mittelwert eines mehrwelligen Stromes ist nun gleich der Summe der quadratischen Mittelwerte der einzelnen Wellen. Da für sinusförmigen Strom der quadratische Mittelwert gleich dem halben Quadrat des Scheitelwertes ist, so erhalten wir:

$$i^2\,\text{eff} = \frac{1}{2}\left[(a_1 e_0 + \frac{3}{4} a_3 e_0^3)^2 + \frac{(a_3 \cdot e_0^3)^2}{4}\right]$$

(5)

$$= \frac{1}{2}\left(a_1^2 e_0^2 + \frac{3}{2} a_1 a_3 e_0^4 + \frac{10}{16} a_3^2 e_0^6\right)$$

Die gesuchte Wechselstromleitfähigkeit ergibt sich nun aus dem Verhältnis der Effektivwerte von Strom und Spannung, also:

$$L^2|\sim| = \frac{i^2\,\text{eff}}{e^2\,\text{eff}}, \text{ wobei } e^2\,\text{eff} = \frac{e_0^2}{2} \text{ ist.}$$

Wir erhalten also:

$$L^2|\sim| = a_1^2 + \frac{3}{2} a_1 a_3 e_0^2 + \frac{10}{16} a_3^2 e_0^4$$

oder

$$L|\sim| = \sqrt{a_1^2 + \frac{3}{2} a_1 a_3 e_0^2 + \frac{10}{16} a_3^2 e_0^4}$$

Setzen wir die oben angegebenen Werte für die Koeffizienten a_1 und a_3 ein, so ergibt sich die „effektive" Wechselstromleitfähigkeit zu:

Diagr.	$L\,\lvert\sim\rvert$	$\cdot 10^{-6}\,\Omega^{-1}$
11	3.87	
12	4.57	
13	4.91	

Als Maximalwerte der dynamischen Leitfähigkeitskurve ergeben sich aus der Zeichnung:

Diagr.	L max $\cdot 10^{-6}\ \Omega^{-1}$
11	4.10
12	4.80
13	5.15

Im ersten Fall ist also der Effektivwert der Wechselstromleitfähigkeit 5,6 %, im zweiten Fall 4,8 %, im dritten Fall 4,7 % kleiner als der Maximalwert.

Wir wollen nun die Wechselstromleitfähigkeit mit der Gleichstromleitfähigkeit vergleichen, und zwar bei gleichen Spannungen, das heißt, wenn die Gleichspannung gleich der effektiven Wechselspannung ist. Aus der statischen Kurve der Diagramme 11, 12, 13 ergeben sich in beiden Richtungen verschiedene Leitfähigkeitswerte für den Gleichstrom. In der Tabelle 9 sind die entsprechenden Gleichstrom- und Wechselstromleitfähigkeiswerte eingetragen und ihr relativer Unterschied berechnet. Daß die Unterschiede in der positiven Richtung kleiner und z. T. negativ sind, läßt noch auf das Vohandensein einer geringen Polarisation schließen. In der negativen Richtung betragen die Unterschiede bis zu 13 %. Bei den Luterbacherschen Zellen (siehe Diagr 14) ist der Unterschied etwas größer (14 bis 20 %). Da aber die Luterbachersche Zelle eine Polarisations E. M. K. besitzt, die die gleiche Richtung wie der polarisierende Strom hat, erscheint wohl aus diesem Grunde die Gleichstromleitfähigkeit etwas größer. Wie aus der Tabelle 10 noch zu ersehen ist, nimmt auch bei dem Selenkristall die Wechselstromleitfähigkeit mit der Wechselspannung zu.

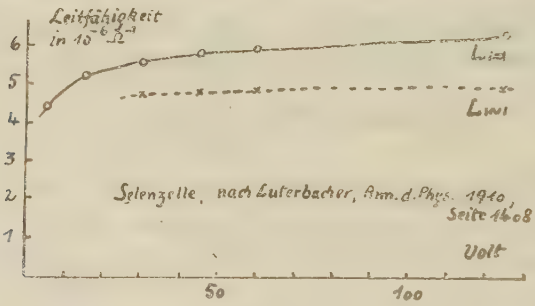


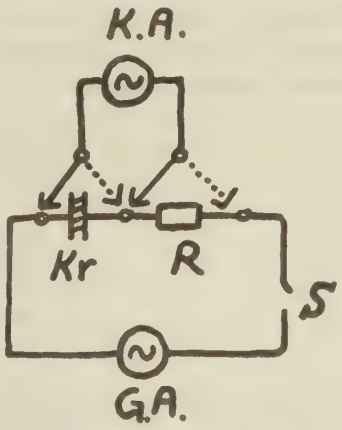
Diagramm 14.

Die experimentelle Bestimmung des Wechselwiderstandes der Selenkristalle wurde nicht dynamometrisch ausgeführt, da bei den kleinen Strömen kein hinreichend empfindliches Elektrodynamometer zur Verfügung stand, sondern wie schon in den Vorversuchen erwähnt, mit Hilfe der Fankeschen Maschine. Hier hatte man zugleich die Möglichkeit, eine etwa vorhandene Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung zu bestimmen, und konnte also feststellen, ob die Verminderung der Wechselstromleitfähigkeit etwa nur eine scheinbare war. Die Wechsel-

stromdiagramme haben allerdings schon gezeigt, daß bei niederen Frequenzen Strom und Spannung in Phase sind. Es liegen nun bei dieser Art der Messung die Verhältnisse etwas anders als bei der dynamometrischen Methode.

Das Prinzip der Frankeschen Maschine ist folgendes: Mittels eines regelbaren Elektromotors rotiert ein Magnetfeld, das in verschiedener Stärke hergestellt werden kann, um zwei koaxiale Anker und induziert in ihnen eine sinusförmige E. M. K. Der eine Anker, der als Generator für den Meßstromkreis dient, steht fest, der andere, der Compensationsanker, ist beweglich angeordnet. Er kann in meßbarer Weise gegen den ersteren gedreht und verschieden tief in das Magnetfeld eingetaucht werden. Hierdurch ist es möglich, sowohl die Amplitude wie die Phase der E. M. K. des zweiten Ankers gegenüber der E. M. K. des ersten in bequemer und schneller Weise zu verändern. Die Anker besitzen außerdem mehrere getrennte Wicklungen, die beliebig eingeschaltet werden können, sodaß das Amplitudenverhältnis in weiten Grenzen verändert werden kann. Mittels des Kompensationsankers kann also jede beliebige Teilspannung des Meßkreises kompensiert werden (als Nullinstrument dient ein Telephon).

Es läßt sich also mit der Frankeschen Maschine der Scheinwiderstand eines beliebigen Aggregates bestimmen, indem die Spannungen über ihm und einem in Serie geschalteten bekannten induktionsfreien Widerstand nacheinander kompensiert werden. (Siehe Schaltungsskizze Figur 6.) Aus dem Verhältnis der den Kompensationseinstellungen entsprechenden E. M. K., die einer Eichkurve entnommen werden können, ergibt sich sofort die Größe des Scheinwiderstandes in Einheiten des Vergleichswiderstandes. Außerdem kann aus den beiden Kompensationseinstellungen der Phasenwinkel zwischen Strom und Spannung direkt abgelesen werden.



Figur 6.

Da also bei dieser Methode die Strom- und Spannungskurven des zu messenden Widerstandes durch eine sinusförmige E. M. K. kompensiert werden, werden nur die in ihnen enthaltenen

Grundschwingungen gemessen. Sind die Strom- und Spannungskurven verzerrt, wie es bei den Selenkristallen nach der besonderen Form der Leitfähigkeitskurve der Fall sein muß, so kann die Kompensation keine ganz vollständige sein. Hierdurch erklärt sich das zuweilen beobachtete Auftreten von schwachen Obertönen bei der Abgleichung mit der Frankeschen Maschine.

Welcher Wert ergibt sich nun für die Wechselstromleitfähigkeit bei dieser Art der Messung? Eine harmonische Analyse der Strom- und Spannungskurven, die den Leitfähigkeitskurven der Diagramme 11, 12, 13 zu Grunde liegen ergibt als Amplitude der Grundschwingung folgende Werte:

Diagr. 11.	Diagr. 12.	Diagr. 13.
$i_0 = 35.2$	$i_0 = 73.8$	$i_0 = 113.7$
$e_0 = 91.4$	$e_0 = 163.6$	$e_0 = 232.1$

Die Wechselstromleitfähigkeiten berechnen sich danach zu:

Diagr.	$L\sim$	
11	3.85	$\cdot 10^{-6}\,\Omega^{-1}$
12	4.52	
12	4.92	

Wir sehen also, daß sich auch nach dieser Methode ein Unterschied der Gleichstrom und Wechselstromfähigkeit ergeben muß. (Daß wir annähernd dieselben Werte wie bei der Bestimmung der Leitfähigkeit aus dem Verhältnis der Effektivwerte von Strom und Spannung erhalten, zeigt übrigens, daß die Verzerrung der Wechselstromkurven nur klein ist.)

Es wurden nun experimentell die Wechselstromleitfähigkeiten für verschiedene Spannungen bei einer Frequenz von 830 Per/sec mit der Frankeschen Maschine bestimmt. In Diagramm 15 (Tabelle 10) sind

Tabelle 10
Kristall III,15

Volt	$L\sim$ in $10^{-6}\,\Omega^{-1}$	φ	Volt	$\bar{L}$ — in $10^{-6}\,\Omega^{-1}$
0.73	3.6	$4^0\,10'$	1	3.90
1.44	4.0	$3^0\,20'$	2	4.73
2.8	4.6	$3^0\,40'$	4	5.75
5.7	5.4	$2^0\,50'$	6	6.32

die so gemessenen Werte zugleich mit den Gleichstromwerten eingetragen. Wie berechnet, liegen die Wechselstromwerte unter den Gleichstromwerten. Ein direkter Vergleich mit den aus den Diagrammen 11, 12

und 13 berechneten (für eine Frequenz von 12/sec gültigen) Werte ist indes hier nicht möglich, da bei diesen Messungen die Temperatur nicht dieselbe war (18° C statt 13° C), also wegen des positiven Temperaturkoeffizienten (15) die Leitfähigkeit bei gleichen Spannungswerten höher ist.

Wie aus Tabelle 11 ferner zu ersehen ist, macht sich bei dieser höheren Frequenz eine Phasenverschiebung bemerkbar. Der Strom eilt der Spannung voraus. Wir haben es also im Kristall mit einem geringen Ladungsstrom zu tun, der vielleicht durch die geringe noch vorhandene Polarisation bedingt ist oder auch einem kapazitiven Nebenschluß infolge dünner Übergangsschichten an den Elektroden zuzusprechen ist. Die Phasendifferenz berechnet sich in einem solchen Falle zu

$$\operatorname{tg}\varphi = w\,C \cdot r$$

wenn w die Kreisfrequenz, C der kapazitive Nebenschluß und r der Selenwiderstand ist. Daß sich die Phasenverschiebung bei der vermutlich geringen Größe des Wertes für C überhaupt bemerkbar macht, liegt daran, daß der Selenwiderstand sehr groß ist, also der Leitungsstrom klein ist, sodaß der geringe Ladungsstrom ihm gegenüber merklich wird. Wie man sieht, nimmt deshalb auch bei höheren Spannungen, wo der Leitungsstrom infolge der vergrößerten Leitfähigkeit verhältnismäßig größer wird, der Phasenwinkel ab.

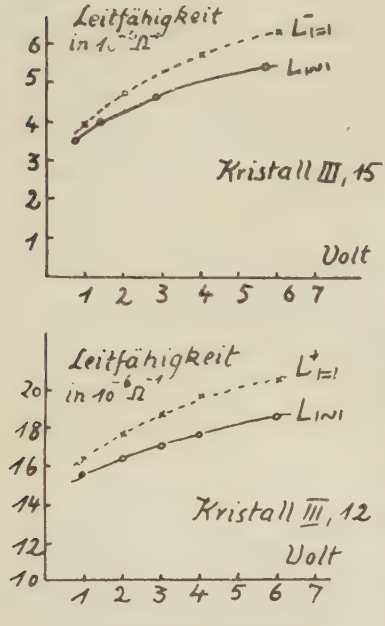


Diagramm 15 und 16.

Tabelle 11

Kristall III,12 V = 830

Volt	$L_{\sim}$ in $10^{-6}\Omega^{-1}$	φ	Volt	$L_{=}^{+}$ in $10^{-6}\Omega^{-1}$
1.00	15.6	+ 42'	1	16.4
1.99	16.3	+ 23'	2	17.6
2.95	17.0	0	3	18.4
3.85	17.6	− 15'	4	19.6
5.74	18.6	− 40'	6	20.4

Diagramm 16 (Tabelle 11) gibt die Messungen an Kristall III,12 wieder. Auch hier ist der Unterschied zwischen Gleichstrom- und Wechselstromleitfähigkeit vorhanden, wie er nach der Form der dynamischen Leitfähigkeitskurve zu erwarten ist. Die Phasenverschiebungen zwischen Strom und Spannung sind hier sehr klein. Daß sie auch negative Werte annimmt, liegt daran, daß der Präzisionswiderstand, wie eingangs erwähnt ebenfalls einen kleinen kapazitiven Phasenwinkel aufweist. Ein Vergleich mit einem Luftkondensator ergab etwa 1 1 2^0 bei einer Frequenz von 830.

Eine Änderung der Wechselstromleitfähigkeit mit der Frequenz ist im Bereich der Frequenzen der Frankeschen Maschine (375 bis 1700) innerhalb der Genauigkeitsgrenze der Messung nicht festzustellen, wie Tabelle 12 zeigt. Tabelle 13 und 14 gibt noch die Messungen der Leitfähigkeit an zwei weiteren Kristallen wieder, die bei den Vor-

Tabelle 12

Kristall III,12 Konstante Spannung e eff 2.0 Volt

V	L\~\ in $10^{-6}\,\Omega^{-1}$	φ
375	16.2	0
525	16.2	0
820	16.1	20‘
1130	16.1	10‘
1700	16.1	0

Tabelle 13

Kristall 1,2 V = 820

Volt	L\~\ in $10^{-6}\,\Omega^{-1}$	φ	Volt	L =\ in $10^{-6}\,\Omega^{-1}$
1.1	1.24	$2^0$15‘	1.0	1.59
2.4	1.34	$1^0$50‘	2.0	1.66
8.6	1.53	$1^0$10‘	7.0	1.97
12.6	1.57	1^0 0‘	12.0	2.11

Tabelle 14

Kristall III,4 V \=\ 830

Volt	L\~\ in $10^{-5}\,\Omega^{-1}$	φ	Volt	L = in $10^{-5}\,\Omega^{-1}$
0.98	1.48	18‘	1.0	1.49
2.2	1.48	10‘	2.0	1.50
4.2	1.49	9‘	4.0	1.53
8.1	1.52	7‘	7.0	1.54
12.1	1.55	3‘	12.0	1.56

versuchen gewonnen wurden. Wir finden hier bestätigt, daß der Unterschied zwischen Gleichstrom- und Wechselstromleitfähigkeit durch die Größe des Spannungseffektes bestimmt wird, denn bei Kristall III, 4, wo der Spannungseffekt infolge der großen Leitfähigkeit sehr gering ist, ist auch der Unterschied sehr klein.

Es dürfte durch diese Untersuchungen gezeigt sein, daß auch der Wechselstromwiderstand der Selenkristalle nicht eine konstante Größe ist, sondern von der Spannung abhängen muß, da eben die dynamische Leitfähigkeitskurve von der Spannung abhängt. Durch die von der statischen abweichende dynamische Leitfähigkeitskurve erklären sich die beobachteten Unterschiede von Gleichstrom- und Wechselstromleitfähigkeit.

§ 9. Anomale Gleichrichtung am Selen.

Durch die Form der Leitfähigkeitskurve wird auch eine besondere Art der Gleichrichtung von Wechselstrom durch das Selen verständlich, die von H. Greinacher (8) gefunden wurde und als anomale Gleichrichtung bezeichnet ist.

Wir hatten durch die Untersuchungen an den Kristallen III, 12 und III, 15 gesehen, daß die Leitfähigkeitskurve *symmetrisch* ist (eine Ausnahme bildet Kristall III, 16) und annähernd in der Form:

$$L = a_1 + a_3 e^2$$

dargestellt werden kann, also der Strom die Form annimmt:

$$(1) \qquad i = a_1 e + a_3 e^3$$

Das Selen wirkt in diesem Falle nicht als Gleichrichter in gewöhnlichem Sinne. Denn da die Charakteristik symmetrisch ist, richtet es sinusförmigen Wechselstrom nicht gleich. Es kann zu einem Gleichrichter gemacht werden durch eine konstante Vorspannung, wie weiter unten untersucht werden wird (Wechselstromeffekt).

Doch haben wir, wie im folgenden gezeigt wirden soll, auch bei einer *reinen* Wechselspannungskurve in bestimmten Fällen eine Gleichrichtung zu erwarten.

In Hinblick auf die folgenden Betrachtungen können wir zwei Hauptgruppen von Kurvenformen einer Wechselspannung unterscheiden:

I. Spannungskurven, bei denen die positive und negative Kurvenhälfte *gleiche* Form hat.

a) Die beiden Kurvenhälften besitzen zentrische Symmetrie, d. h. sie lassen sich durch Drehung um 180° zur Deckung bringen. Fig. 5a.

b) Die beiden Kurvenhälften sind spiegelbildlich gleich, d. h. sie lassen sich durch Parallelverschiebung und Umklappen zur Deckung bringen. Fig. 5b.

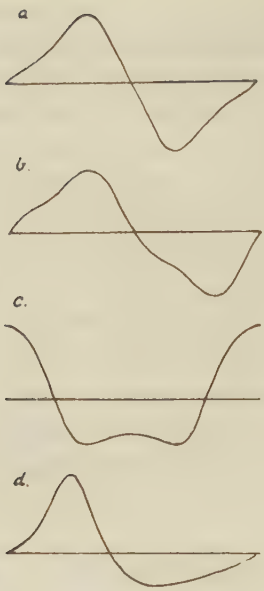


Fig. 5.

II) Spannungskurven, bei denen die positive und negative Kurvenhälfte verschiedene Form hat (bei gleichem Flächeninhalt).

a) Die Spannungskurve ist symmetrisch zu einer Ordinate. Fig. 5c.

b) Die Kurve hat in beiden Kurvenhälften beliebigen Verlauf. Figur 5d.

Zur analytischen Behandlung benutzen wir die Fourierentwicklung einer periodischen Funktion. Nach Fourier kann jede beliebige periodische Funktion (Wechselspannung) dargestellt werden durch die Reihe:

$$(2) \qquad e = \sum_{k=0}^{\infty} e_k \sin (kwt + \varphi_k)$$

d. h. durch eine Grundschwingung der Periode der Funktion und eine unendliche bezw. endliche Zahl von Oberschwingungen verschiedener Amplitude und Phase. Diese Darstellung ist eindeutig. Liegt eine reine Wechselspannung vor, so verschwindet das konstante Glied, d. h. die Reihe beginnt mit $k = 1$.

Statt dieser Entwicklung kann auch die folgende benutzt werden:

$$(3) \qquad e = e_0 + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \sin kwt + \sum_{k=1}^{\infty} b_k \cos kwt$$

die aus (2) hervorgeht, wenn

$$a_k = e_k \cos \varphi_k \text{ und } b_k = e_k \sin \varphi_k$$

gesetzt wird.

Für die soeben beschriebenen verschiedenen Typen von Kurvenformen ergeben sich folgende Fourierentwicklungen:

1a) Wenn wir $e = f(t)$ setzen, so lautet die Bedingung für eine zentrisch-symmetrische Kurve:

$$f(t) = -f(-t)$$

In der Fourierentwicklung (3) müssen auf Grund dieser Beziehung alle Cosinusglieder verschwinden. Sie hat also die Form:

$$f(t) = \sum_{k=1}^{\infty} a_k \sin kwt$$

b) Diese Kurvenform besitzt für Zeitwerte, die um T/2 auseinanderliegen, gleiche aber entgegengesetzte Funktionswerte. Es ist also

$$f(t) = -f(t + T/2)$$

In der Fourierentwicklung (2) ist dann:

$$\begin{aligned}\sin(kwt + \varphi_k) &= -\sin[kw(t + T/2) + \varphi_k] \\ &= -\sin(kwt + \varphi_k) \cdot \cos k\pi \\ &= -(-1)^k \sin(kwt + \varphi_k)\end{aligned}$$

Dies ist nur möglich, wenn die geraden Oberschwingungen verschwinden. Die Entwicklung enthält also nur ungeradzahlige Sinus- und Cosinusglieder.

IIa) Für diese Kurvenform gilt:

$$f(t) = f(-t)$$

Also müssen in der Entwicklung (3) alle Sinusglieder verschwinden. Da reine Wechselspannung vorliegen soll, muß außerdem $b = 0$ sein. Es ist also:

$$f(t) = \sum_{k=1}^{\infty} b_k \cos wt$$

b) Im allgemeinen Fall einer unsymmetrischen Kurvenform können in der Fourierentwicklung (2) oder (3) sowohl k wie die Koeffizienten der Sinus und Cosinusglieder beliebige Werte annehmen.

Wir stellen nun folgende allgemeine Frage:
An einen Leiter mit der Charakteristik

$$i = a_1 e + a_3 e^3$$

werde eine Wechselspannung von bestimmter Kurvenform gelegt. Kann dann eine Gleichstromkomponente auftreten? In welchen Fällen geschieht dies? Welche Größe hat diese Gleichstromkomponente?

Wie qualitativ wohl zu übersehen ist, wird im Fall I aus „Symmetriegründen" keine Gleichrichtung auftreten, dagegen im Fall II eine teilweise Gleichrichtung des Wechselstromes zu erwarten sein.

Um die Frage in analytischer Form allgemein zu lösen, greifen wir auf die soeben angeführten Fourierschen Entwicklungen einer Spannungskurve zurück. Die dort abgeleiteten verschiedenen typischen Kurvenformen sollen jetzt nacheinander behandelt werden.

Ia) Symmetrische Kurvenform (beide Kurvenhälften haben gleiche Form). Die Fourierentwicklung enthält nur Sinusglieder. Wir können also für die Spannung schreiben:

$$e = \sum_{k=1}^{k=\infty} e_k \sin kwt$$

Der Strom nimmt dann die Form an:

$$i = a_1 \sum_1^k e_k \sin kwt + a_3 \left\{ \sum_1^k e_k \sin kwt \right\}^3$$

Enthält dieser Ausdruck für den Strom eine Gleichstromkomponente, so ist dies daran zu erkennen, daß nicht-periodische Glieder auftreten.

Um dies zu sehen, formen wir den Ausdruck für i zweckmäßig so um, daß er aus einer Summe von lauter Gliedern besteht, die Sinusfunktionen nur vom ersten Grade darstellen.

Wir sehen sofort, daß der erste Ausdruck: $a_1 \sum_1^k e_k \sin kwt$ für alle Werte von $k = 1$ bis $k = \infty$ nur Sinusglieder des vielfachen Winkels von wt enthält, also keinen Beitrag zu einer Gleichstromkomponente liefert.

Um zu übersehen, ob der zweite Ausdruck, der ja von der Abweichung vom Ohmschen Gesetz herrührt, eine Gleichstromkomponente hervorruft, schreiben wir ihn zunächst in der Form einer dreifachen Summe:

$$a_3 \left\{ \sum_1^k e_k \sin kwt \right\}^3 = a_3 \sum_{m=1}^k \sum_{n=1}^k \sum_{r=1}^k e_m \cdot e_n \cdot e_r \sin mwt \cdot \sin nwt \cdot \sin rwt$$

Dabei sind die Summenzeichen so zu verstehen, daß zunächst summiert wird über alle Glieder $e_m \cdot e_n \cdot e_r \sin mwt \cdot \sin nwt \cdot \sin rwt$, indem m von 1 bis k läuft, dann über diese Summe nochmals summiert wird, indem n von 1 bis k läuft, und endlich über diese Doppelsumme summiert wird, indem r von 1 bis k läuft. Die Gesamtzahl der Glieder ist gleich der Anzahl der Variationen aus k Elementen zur 3. Klassen mit Wiederholungen, beträgt also k^3.

Um zu entscheiden, ob eines dieser Produkte von periodischen Funktionen ein konstantes Glied, das einer Gleichstromkomponente entspricht, enthält, formen wir den Ausdruck:

$$\sin mwt \cdot \sin nwt \cdot \sin rwt$$

in eine Summe von periodischen Funktionen um.

Wir gehen aus von den bekannten Formeln, die sich aus den Additionstheoremen der trigonometrischen Funktionen ergeben:

a) $\sin\alpha \cos\beta = \frac{1}{2} \{\sin(\alpha+\beta) + \sin(\alpha-\beta)\}$

b) $\cos\alpha \cos\beta = \frac{1}{2} \{\cos(\alpha+\beta) + \cos(\alpha-\beta)\}$

c) $\sin\alpha \cdot \sin\beta = \frac{1}{2} \{\cos(\alpha-\beta) - \cos(\alpha+\beta)\}$

Das dreifache Produkt von Sinusfunktionen geht durch zweimalige Anwendung dieser Formeln über in:

$$\tfrac{1}{4}\{\sin(m-n+r)\,wt+\sin(n+r-m)\,wt-\sin(m+n+r)\,wt-\sin(r-m-n)\,wt\}$$

Die dreifache Summe können wir also schreiben:

$$\tfrac{1}{4}\,a_3\sum\sum\sum e_m\cdot e_n\cdot e_r\{\sin(m-n+r)\,wt+\sin(n+r-m)\,wt-\sin(m+n+r)\,wt-\sin(r-m-n)\,wt\}$$

Wir haben jetzt eine Summe von reinen Sinusfunktionen der Vielfachen des Winkels wt vor uns.

Für irgend eine Kombination von Wertetripeln m, n, r kann eines dieser Sinusglieder nur konstant werden, wenn es Null wird, d. h. es tritt in diesem Ausdruck keine Gleichstromkomponente auf und damit überhaupt nicht im Fall I, a.

IIa) Wir behandeln jetzt den anderen Fall, daß die Fourierentwicklung nur Cosinusglieder enthält, die Kurve also in ihrem positiven und negativen Teil verschiedenen Verlauf hat.

Für die Spannung setzen wir also:

$$e=\sum_{k=1}^{\infty}e_k\cos kwt$$

Der Strom ergibt sich dann zu:

$$i=a_1\sum_{1}^{k}e_k\cos kwt+a_3\left\{\sum_{1}^{k}e_k\cos kwt\right\}^3$$

Hier ist der erste Ausdruck auch wieder rein periodisch, liefert also keine Gleichstromkomponente.

Der zweite Ausdruck läßt sich wieder in einer dreifachen Summe von Produkten der Form $\cos mwt\cdot\cos nwt\cdot\cos rwt$ schreiben, die sich nach den Formeln a — c in eine Summe von einfachen Cosinusgliedern umformen läßt. Wir erhalten:

$$a_3\left\{\sum_{1}^{k}\cos kwt\right\}^3=a_3\sum_{m=1}^{k}\sum_{n=1}^{k}\sum_{r=1}^{k}e_m\cdot e_n\cdot e_r\cos mwt\cdot\cos nwt\cdot\cos nwt$$

$$=\tfrac{1}{4}\,a_3\sum\sum\sum e_m\cdot e_n\cdot e_r\{\cos(r+m+n)\,wt+\cos(r-m-n)\,wt+\cos(m+r-n)\,wt+\cos(r-m+n)\,wt\}$$

Nur dann, wenn ein Faktor des Argumentes von wt gleich Null wird, wird dies Glied konstant und zwar nimmt es den Wert 1 an. Die Bedingungen für das Konstantwerden eines Cosinusgliedes und damit das Auftreten einer Gleichstromkomponente lauten also:

$$r - m - n = 0 \qquad \text{oder} \quad m + n = r$$
$$r - m + n = 0 \qquad\qquad n + r = m$$
$$r + m - n = 0 \qquad\qquad r + m = n$$

Das erste Glied mit dem Faktor $m + n + r$ kann nicht Null werden, da m, n, r ganze positive Zahlen sind.

Die Gleichstromkomponente ist also gegeben durch den Ausdruck:

$$I_0 = \tfrac{1}{4} a_3 \{\Sigma\Sigma\Sigma\, e_m \cdot e_n \cdot e_r \text{ (wobei } m + n = r)$$
$$+ \Sigma\Sigma\Sigma\, e_m \cdot e_n \cdot e_r \text{ (wobei } n + r = m)$$
$$+ \Sigma\Sigma\Sigma\, e_m \cdot e_n \cdot e_r \text{ (wobei } r + m = n)$$

Da die drei Bedingungen in m, n, r dieselbe Form haben und durch zyklische Vertauschung der gleichwertigen m, n, r in einander übergehen, lassen sie sich in eine einzige Bedingung zusammen fassen und wir können schreiben:

$$(4) \qquad I_0 = \tfrac{3}{4} a_3 \sum_{m=1}^{k} \sum_{n=1}^{k} \sum_{r=1}^{k} \text{ (wobei } m + n = r)$$

I_0 setzt sich also zusammen aus der Summe aller Variationen von k Elementen e_k (Fourierkoeffizienten) zur dritten Klasse mit Wiederholung, wobei aber nur die Wertetripel zur Konkurrenz zugelassen sind, die der Bedingung $m + n = r$ genügen. Es sind dies, wie leicht zu zeigen ist, $k/2\ (k - 1)$.

Für den resultierenden Gleichstrom erhalten wir explizite folgenden Ausdruck:

$$(5) \qquad I_0 = \tfrac{3}{4} a_3 \{e_1^2\, e_2$$
$$+ 2\, e_1\, e_2\, e_3$$
$$+ 2\, e_1\, e_3\, e_4 + e_2^2\, e_4$$
$$+ 2\, e_1\, e_4\, e_5 + 2\, e_2\, e_3\, e_5$$
$$+ 2\, e_1\, e_5\, e_6 + 2\, e_2\, e_4\, e_6 + e_3^2\, e_6$$
$$+ \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad .$$
$$\vdots$$
$$+ 2\, e_1\, e_{k-1}\, e_k + 2\, e_2\, e_{k-2}\, e_k + \cdots + e_{k/2}^2\, e_k \text{ falls k}$$

gerade oder statt der letzten Zeile:

$$+ 2\, e_1\, e_{k-1}\, e_k + 2\, e_2\, e_{k-2}\, e_k + \cdots + 2\, e_{\frac{k-1}{2}}\, e_{\frac{k+1}{2}}\, e_k \text{ falls k ungerade.}$$

Es ist also hiermit gezeigt, daß, wenn die Spannungskurve nur aus Cosinusgliedern besteht, eine Gleichstromkomponente auftritt, die die durch die Gleichung (5) bzw. (4) gegebene Größe besitzt.

Liegt z. B. die Spannungskurve vor:

$$e = e_1 \cos wt + e_2 \cos 2\, wt$$

so ist die Gleichstromkomponente gegeben durch:

$$I_0 = \tfrac{3}{4}\, a_3\, e_1^2\, e_2$$

Ib) Wir behandeln jetzt den Fall der spiegelbildlichen Spannungskurve. Sie ist dargestellt durch die Fourierentwicklung:

$$e = \sum_1^k e_k \sin kwt + \sum_1^k e_k' \cos kwt$$

wo k nur ungerade Werte hat.

Der Ausdruck für den Strom lautet:

$$i = a_1 \left\{ \sum_1^k e_k \sin kwt + \sum_1^k e_k' \cos kwt \right\} + a_3 \left\{ \sum_1^k e_k \sin kwt + \sum_1^k e_k' \cos kwt \right\}^3$$

Auch hier ist der erste Ausdruck wieder eine reinperiodische Funktion. Es handelt sich also nur darum, den zweiten Ausdruck auf konstante Glieder hin zu prüfen.

Nun ist:

$$\begin{aligned}
\{\Sigma e_k \sin kwt + \Sigma e_k' \cos kwt\}^3 = {} & \{\Sigma e_k \sin kwt\}^3 + 3\{\Sigma e_k \sin kwt\}^2 \Sigma e_k' \cos kwt \\
& + 3 \Sigma e_k \sin kwt \{\Sigma e_k' \cos kwt\}^2 + \{\Sigma e_k' \cos kwt\}^3 \\
= {} & \Sigma\Sigma\Sigma e_m e_n e_r \sin mwt \cdot \sin nwt \cdot \sin rwt \\
& + 3 \Sigma\Sigma\Sigma e_m \cdot e_n \cdot e_r' \sin mwt \cdot \sin nwt \cdot \cos rwt \\
& + 3 \Sigma\Sigma\Sigma e_m \cdot e_n' \cdot e_r' \sin mwt \cdot \cos nwt \cdot \cos rwt \\
& + \Sigma\Sigma\Sigma e_m' \cdot e_n' \cdot e_r' \cos mwt \cdot \cos nwt \cdot \cos rwt
\end{aligned}$$

Formen wir die Produkte der Sinus- und Cosinusfunktionen nach den Formeln a – c in Summen um, so erhalten wir:

$$\begin{aligned}
(6)\quad & \tfrac{1}{4} a_3 \Sigma\Sigma\Sigma e_m \cdot e_n \cdot e_r \{\sin(m - n + r)wt + \sin(n + r - m)wt \\
& \qquad - \sin(m + n + r)wt - \sin(r - m - n)wt\} \\
- & \tfrac{3}{4} a_3 \Sigma\Sigma\Sigma e_m \cdot e_n \cdot e_r' \{\cos(m - n + r)wt + \cos(m - n - r)wt \\
& \qquad - \cos m + n + r)wt - \cos(m + n - r)wt\} \\
+ & \tfrac{3}{4} a_3 \Sigma\Sigma\Sigma e_m \cdot e_n' \cdot e_r' \{\sin(m + n + r)wt + \sin(m - n - r)wt \\
& \qquad + \sin(m + n - r)wt + \sin(m - n + r)wt\} \\
- & \tfrac{1}{4} a_3 \Sigma\Sigma\Sigma e_m' \cdot e_n' \cdot e_r' \{\cos(r + m + n)wt + \cos(r - m - n)wt \\
& \qquad + \cos(r + m - n)wt + \cos(r - m + n)wt\}
\end{aligned}$$

Die Bedingungen dafür, daß konstante Glieder auftreten, lauten auch hier wieder:

$$(7)\qquad \begin{aligned} m + n &= r \\ n + r &= m \\ r + m &= n \end{aligned}$$

und zwar für den zweiten und vierten Ausdruck, in dem die Cosinusglieder vorkommen, denn die beiden Ausdrücke mit den Sinusgliedern liefern keinen Beitrag.

Da aber m, n, r ungerade Zahlen sind, kann keine dieser Bedingungen erfüllt werden.

Es tritt also bei dieser Form der Wechselspannung keine Gleichstromkomponente auf.

IIb) Auch für den Fall einer völlig unsymmetrischen Kurve gilt die Entwicklung (6). Aber hier können m, n, r alle beliebigen Werte zwischen 1 und k annehmen, sodaß die Bedingungen (7) im allgemeinen erfüllt werden können.

Es tritt hier eine Gleichstromkomponente auf von der Größe:

$$\begin{aligned} I_0 = \tfrac{3}{4}\, a_3 \{ &- \Sigma\Sigma\Sigma\, e_m \cdot e_n \cdot e_r' \text{ (wobei } m + n = r) \\ &+ \Sigma\Sigma\Sigma\, e_m \cdot e_n \cdot e_r' \text{ (wobei } r + n = m) \\ &+ \Sigma\Sigma\Sigma\, e_m \cdot e_n \cdot e_r' \text{ (wobei } r + m = n)\} \\ + \tfrac{1}{4}\, a_3 \{ &\Sigma\Sigma\Sigma\, e_m' \cdot e_n' \cdot e_r' \text{ (wobei } m + n = r) \\ &+ \Sigma\Sigma\Sigma\, e_m' \cdot e_n' \cdot e_r' \text{ (wobei } n + r = m) \\ &+ \Sigma\Sigma\Sigma\, e_m' \cdot e_n' \cdot e_r' \text{ (wobei } r + m = n)\} \end{aligned}$$

Der zweite Ausdruck ist schon bei Fall IIa) behandelt, der ja ebenso wie die übrigen Fälle nur Spezialfälle dieses allgemeinen Falles sind.

Im ersten Ausdruck lassen sich die zweite und dritte Bedingung wieder zusammenfassen, da sie gleichwertig sind in m und n.

Wir erhalten also für die Gleichstromkomponente im allgemeinsten Falle:

$$(8)\qquad \begin{aligned} I_0 = \tfrac{3}{4}\, a_3 \{ &\Sigma\Sigma\Sigma\, e_m \cdot e_n \cdot e_r' \text{ (wobei } m + n = r) \\ &+ 2\,\Sigma\Sigma\Sigma\, e_m \cdot e_n \cdot e_r' \text{ (wobei } r + m = n) \\ &+ \Sigma\Sigma\Sigma\, e_m' \cdot e_n' \cdot e_r' \text{ (wobei } m + n = r)\} \end{aligned}$$

Der explizite Ausdruck für I_0 läßt sich also hiernach, wenn die Fourierkoeffizienten bekannt sind, sofort angeben. Er lautet ganz analog dem Ausdruck für die Cosinusreihe (5) und befolgt dasselbe Bildungsgesetz wie dort. Es sei deshalb darauf verzichtet, ihn im einzelnen hinzuschreiben.

Wenn eben gesagt wurde, daß im allgemeinen bei einer unsymmetrischen Kurvenform sich die angegebenen Bedingungen erfüllen

ließen, also eine Gleichstromkomponente auftritt, so braucht das nicht in allen Fällen zuzutreffen, wie man aus dem letzten Ausdruck für I_0 ersieht.

1. Es können auch in einer völlig unsymmetrischen Kurve nur solche Glieder vorkommen, daß sich die Nebenbedingungen nicht erfüllen lassen. Theoretisch lassen sich beliebig viele Kombinationen von Sinus- und Cosinusgliedern angeben, sodaß dies zutrifft.

2. Aber selbst für den Fall, daß sich die Nebenbedingungen erfüllen lassen, können sich die einzelnen Produkte

$$e_m \cdot e_n \cdot e_r' \text{ und } e_m' \cdot e_n' e_r'$$

gerade aufheben, denn sie können sowohl positiv wie negativ sein.

Die Diskussion der Gleichung (8) zeigt also, daß auch bei unsymmetrischen Kurven unter Umständen die Gleichstromkomponente **verschwinden** kann.

Über die Richtung der Gleichstromkomponente sei noch folgendes gesagt:

Da der Ausdruck für I_0 aus einer Summe von Produkten der Form:

$$e_m \cdot e_n \cdot e_r$$

besteht, also vom dritten Grade in den Fourierkoeffizienten ist, kehrt er sein Vorzeichen um, wenn die Wechselspannung kommutiert wird, d. h. e in $-e$ übergeht; denn alle Fourierkoeffizienten vertauschen damit ihr Vorzeichen.

Die hier durchgeführten Betrachtungen geben eine Erklärung für die von Greinacher gefundene Erscheinung der „anomalen Gleichrichterwirkung am Selen".

Greinacher kommt zu folgenden experimentellen Ergebnissen über diesen Effekt (8.):

„Das Selen übt eine Gleichrichterwirkung auf Wechselstrom aus, die von der Richtung des Wechselstromes abhängt. Wird die Wechselstromquelle durch eine parallelgeschaltete Kapazität auf Rosonanz eingestellt (also die Spannungskurve gereinigt), so wird die Gleichrichtung unabhängig von der Wechselstromrichtung. Man erhält auch unter anderen Bedingungen solche Gleichheitspunkte. Sie sind dadurch charakterisiert, daß man hier nur die normale, durch Unsymmetrie der Zelle bedingte Gleichrichtung erhält. Im allgemeinen addiert sich hierzu algebraisch die anomale Gleichrichtung. Diese ist mit dem Strom kommutierbar. Der anomale Effekt ist zu erwarten, wenn beide Halbwellen des Wechselstromes verschiedenen Verlauf (bei gleicher

Fläche) haben. Sind sie jedoch gleich, so tritt auch bei beliebiger Kurvenform kein anomaler Effekt auf."

Wie außerdem zahlreiche von ihm angestellte Versuche zeigen, kann auch bei völlig unsymmetrischer Kurvenform der Effekt verschwinden.

Die in § 8 untersuchte Charakteristik bezw. Leitfähigkeitskurve gibt also auch für diese Erscheinungen eine einfache und völlig ausreichende Erklärung.

§ 10. Wechselstromeffekt.

Wie eben gezeigt worden ist, kann eine Gleichrichterwirkung an Selenkristallen, die sich zwischen vollkommen symmetrischen Elektroden befinden und also eine symmetrische Charakteristik besitzen, nur bei gewisser unsymmetrischer Form der Wechselspannung auftreten. Aber auch eine sinusförmige Wechselspannung kann gleichgerichtet werden, wenn ihr noch eine Gleichspannung überlagert wird. Denn dadurch erreicht man eine künstliche Unsymmetrie der Charakteristik. Diese Methode wird ja z. B. auch bei manchen Detektoren der Wellentelegraphie angewandt, um eine möglichst günstige Wirkung zu erzielen. Die hierbei auftretenden Verhältnisse hat H. Brandes (16) unter Zugrundelegung der Charakteristik des betreffenden Leiters rechnerisch allgemein behandelt. Er glaubt berechtigt zu sein, die aus Gleichstrommessungen gewonnene Charakteristik auch auf die Wechselstromverhältnisse ohne weiteres zu übertragen. Dies mag bei manchen Detektoren erlaubt sein. Wie aber die an Selenkristallen aufgenommenen Wechselstromdiagramme zeigen, ist hier die Übertragung nicht gestattet, da die Gleichstrom- und Wechselstromcharakteristik nicht identisch sind.

Um nun hier die Verhältnisse im einzelnen zu übersehen, wurden in der Anordnung der Figur 7 Wechselstromdiagramme für Wechselstrom und gleichzeitigen Gleichstrom aufgenommen.

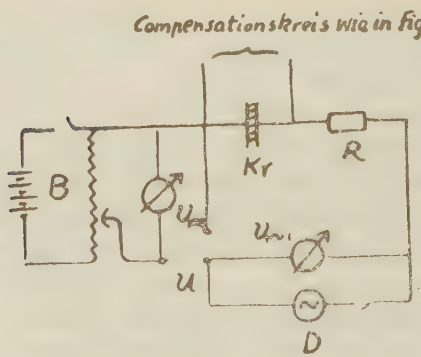
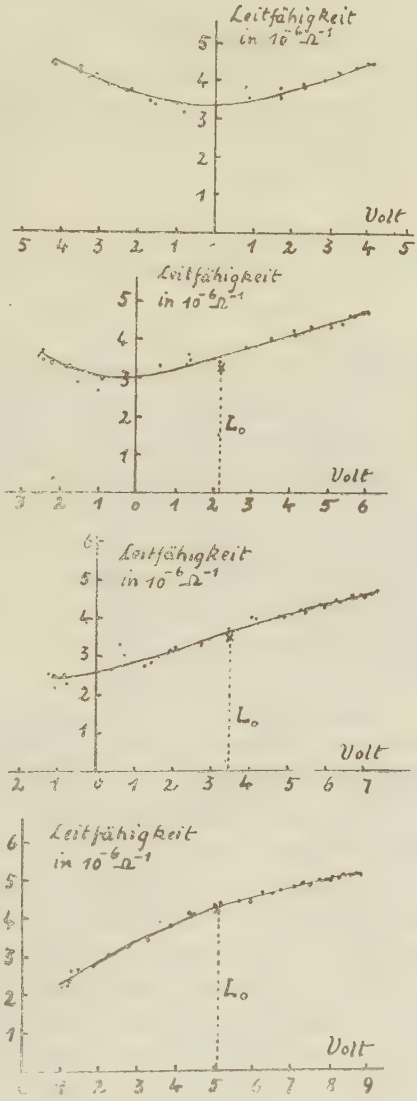


Fig. 7.

Wie die in Diagramm 17, a—d wiedergegebenen Leitfähigkeitskurven deutlich zeigen, haben diese Kurven sehr verschiedene Form je nach der Größe der Gleichspannung im Verhältnis zur Wechselspannung. Diagr. 17a ist bei der Gleichspannung Null aufgenommen und zeigt das schon in §7 behandelte Bild

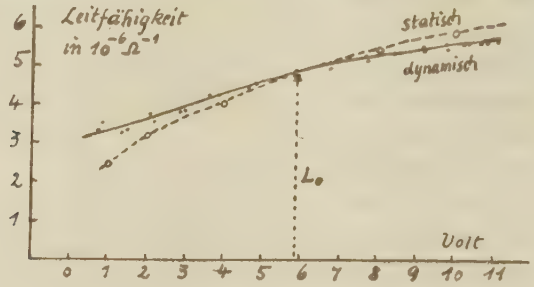
einer Wechselstromleitfähigkeitskurve. Sie entspricht angenähert einer Parabel zweiten Grades. Mit zunehmender Gleichspannung streckt sich die Kurve und weist einen Wendepunkt in der Nähe des Ruhepunktes auf (Diagr. 17c). Wird die Gleichspannung ebensogroß oder größer als die Wechselspannung (Diagramm 17d und 18), so verläuft die Kurve fast nur noch konvex zur Spannungsachse und nähert sich in ihrer Form der statischen Kurve. Wie aber die in Diagr. 18 gleichzeitig eingezeichnete statische Kurve zeigt, hat die dynamische Kurve einen flacheren Verlauf: bei höheren Spannungswerten liegt sie unter, bei niederen über der statischen Kurve. Es ist dies, wie schon in § 6 und 7 ausgesprochen, eine Folge der dem Selen eigentümlichen Dunkelträgheit. Wir ersehen also hieraus, daß die Gleichrichterwirkung des Selens kleiner ist, als aus der statischen Kurve folgen würde.



Diagr. 17a, 17b, 17c, 17d.

Wie schon in § 2 angegeben wurde, hat H. Greinacher ebenfalls die gleichzeitige Einwirkung von Gleich- und Wechselstrom auf das Selen untersucht. Er legt die zu untersuchende Selenzelle in einen Zweig einer Wheatstonschen Brücke, gleicht mit Gleichstrom auf Stromlosigkeit ab und überlagert dann mittels Transformators einen passenden Wechselstrom. Es fließt dann ein Gleich-

strom, der den ursprünglichen Strom verstärkt, also im Sinne einer Widerstandsverminderung des Selens wirkt. Greinacher weist nun



Diagr. 18

darauf hin, daß dieser Effekt sehr dem Lichteffekt ähnelt. Sowohl durch Licht wie durch Wechselstrom tritt eine Vergrößerung des ursprünglichen Stromes ein. Er sucht den inneren Zusammenhang in der Verwandtschaft des Lichtes mit Wechselströmen. Er studiert beide Effekte in ihrer Abhängigkeit von der Intensität, der Stromstärke, der Trägheit und der Temperatur. Aus dem weitgehenden Parallelismus beider glaubt Greinacher schließen zu dürfen, daß es sich bei beiden Erscheinungen um denselben Vorgang handelt (Wirkung elektromagnetischer Wellen); der Unterschied liegt nur in der sehr großen Verschiedenheit der Frequenz.

Wie nun Chr. Ries (10) schon betont, kann dieser von Greinacher vermutete Zusammenhang nicht bestehen, da der Wechselstromeffekt bei Belichtung zurückgeht bzw. ganz verschwindet.

Nach den Untersuchungen der vorliegenden Arbeit erscheint der von Greinacher gefundene Wechselstromeffekt als eine einfache Folgerung, die aus der Form der Selencharakteristik zu ziehen ist. Tatsächlich zeigen ja auch die Greinacherschen Zellen den Spannungseffekt, wenn auch nicht so ausgeprägt, wie die hier untersuchten Selenkristalle. Die Widerstandsänderung beträgt, wie aus den wenigen Angaben Greinachers (l. c. Seite 126) über die Spannungsabhängigkeit des Wechselstromeffektes hervorgeht, bei drei seiner Zellen zwischen 0,5 und 10 Volt 10% bzw. 3% bzw. 18%. Doch lassen diese Zahlen, wie Greinacher angibt, keinen quantitativen Vergleich zu, da die Messungen an verschiedenen Tagen ausgeführt sind. Man sieht aber aus den Kurven, die die Abhängigkeit des Wechselstromeffektes von der Wechselstromintensität angeben, deutlich den Zusammenhang zwischen Spannungs-

effekt und Wechselstromeffekt. Denn die Zellen mit großem Spannungseffekt (S_1 und S_3) zeigen auch einen großen Wechselstromeffekt. (l. c. Seite 124).

Da die Messungen von Greinacher über die Gleichrichtung am Selen unter einem einseitigen Gesichtspunkt angestellt sind und auch Ries die Gleichrichtung unter speziellen Bedingungen (Funkeninduktor) untersucht, wurden die Messungen an Selenkristallen noch weiter ausgedehnt und im besonderen die Abhängigkeit von der angelegten Gleich- oder Wechselspannung und der Frequenz verfolgt.

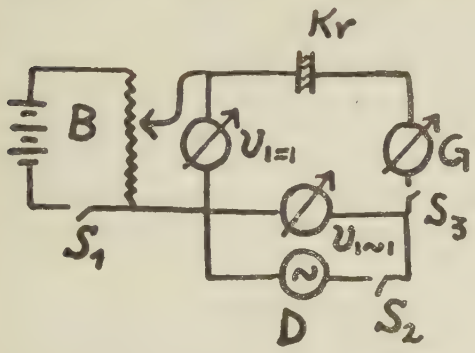


Fig. 8

Es konnte hierbei auf die Brückenschaltung, die Greinacher verwandt hat, verzichtet werden, da infolge des großen Spannungseffektes der Kristalle die Gleichrichtung auch bei den verhältnismäßig niedrigen Spannungen sehr erheblich war und stets in der Größenordnung des Ruhestromes lag. Die Messungen wurden in der Anordnung der Figur 8 ausgeführt. Mittels der Schalter S_1 und S_2 konnte eine Gleichspannung und sinusförmige Wechselspannung einzeln und gleichzeitig angelegt werden. Die Spannungen wurden durch die beiden Voltmeter V ⎓ und V ∿ gemessen. Diese entsprachen genügend genau den am Kristall anliegenden Spannungen, da gegenüber dem Selenwiderstand alle übrigen Widerstände des Kreises klein waren. Bei den einzelnen Messungen wurde so vorgegangen, daß zunächst eine bestimmte Gleichspannung angelegt wurde und 10' gewartet wurde, bis der Ruhestrom annähernd konstant geworden war. Dann wurde in Pausen von 5' die Wechselspannung verschiedener Größe angelegt und nach einer Minute der Ausschlag am Galvanometer beobachtet. Die Einstellung erfolgte auch hier mit einer geringen Trägheit. Die Differenz dieses Ausschlages und des Ruhestromes war der gesuchte Gleichrichtereffekt.

Diagr. 19a und b (Tabelle 14) gibt eine derartige Meßreihe an Kristall III,15 bei einer Frequenz von 12/sec. wieder. Mit wachsender Gleichspannung (Diagr. 19a) nimmt die Gleichrichtung des Wechsel-

Tabelle 14

Kristall III,15 $\nu = 12$/sec.

Volt ~	Volt |—| 0	1	2	4	6	$\cdot 10^{-7}$ Amp.
1.5	−2.5	10.5	11.2	8.2	6.5	
4.0	−4.2	29.1	34.7	29.7	18.8	
6.2	+1.2	37.7	47.2	44.9	34.2	
8.5	+2.2	41.2	53.9	59.3	54.0	

stromes zunächst zu, erreicht ein Maximum und nimmt dann wieder ab. Dies Maximum wird bei höherer Wechselspannung später erreicht. Es entspricht dies dem Übergang der Leitfähigkeitskurven aus der parabelförmigen Gestalt in eine gestreckte Form. Das Maximum der Gleichrichtung entspricht einer Mittellage, in der die Leitfähigkeitskurve gerade die größte mittlere Steilheit (durch die die Gleichrichtung gegeben ist) besitzt. Bei konstanter Gleichspannung (Diagr. 19b) nimmt die Gleichrichtung mit wachsender Wechselspannung zunächst stärker als linear zu.

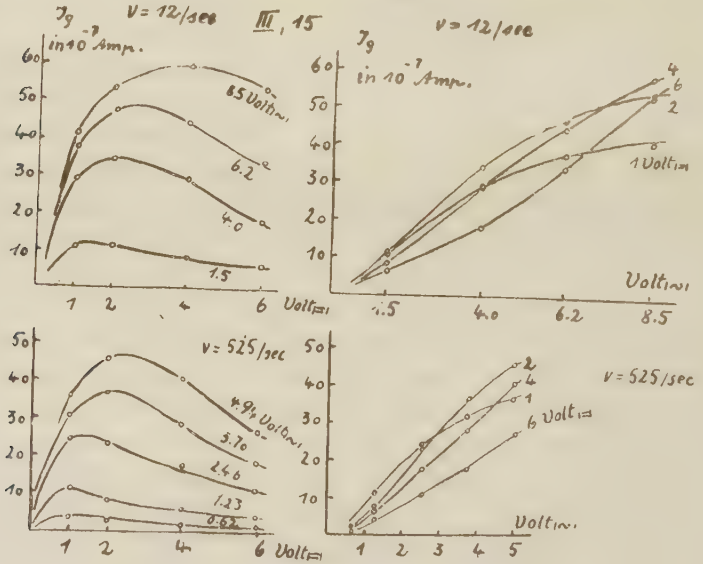


Diagramm 19a, 19b, 20a, 20b

Hätte die Leitfähigkeitskurve eine konstante Neigung, so erfolgte das Anwachsen genau quadratisch, wie die folgende Rechnung zeigt:

Es betrage die Gleichspannung e_0 und die ihr entsprechende Leit-

fähigkeit L_0. Wird eine sinusförmige Wechselspannung überlagert, so ist die an dem Kristall liegende Spannung $e = e_0 + e_1 \sin wt$, wo e_1 der Scheitelwert der Wechselspannung ist. Nehmen wir an, daß der Verlauf der Leitfähigkeitskurve in Abhängigkeit von der Spannung gradlinig erfolgt (was annähernd zutrifft, wenn die Wechselspannung klein im Verhältnis zur Gleichspannung ist), so können wir schreiben $L = L_0 + L' e_1 \sin wt$, wo L' die konstante Neigung der Leitfähigkeitskurve bedeutet. Der Strom ist dann gegeben durch:

$$i = L \cdot e$$
$$= L_0 + L' e_1 \sin wt' \; (e_0 + e_1 \sin wt)$$
$$= e_0 L_0 + e_1^2 \frac{L'}{2} + (e_0 L' e_1 + L_0 e_1) \sin wt - e_1^2 \frac{L'}{2} \cos 2 wt$$

Der von einem Gleichstrominstrument angezeigte Strom ist infolgedessen:

$$I = e_0 L_0 + e_1^2 \frac{L'}{2}$$

und die Gleichrichtung des Wechselstromes gegeben durch

$ig = e_1^2 \frac{L'}{2}$, also proportional der Neigung der Leitfähigkeitskurve und dem Quadrat der Wechselspannung.

Diagramm 20a und b gibt eine Messung ebenfalls an Kristall III,15 bei einer Frequenz von 525 sec und etwas anderen Spannungen wieder. Als Generator diente hier die Frankesche Maschine. Wir erhalten denselben Verlauf der Kurven wie bei einer Frequenz von 12 sec. Ein Vergleich von Diagr. 19b und 20b läßt erkennen, daß gleichen Werten der Gleich- und Wechselspannung auch etwa derselbe Wert der Gleichrichtung entspricht. Es wird hier also der Schluß bestätigt, den wir aus den Aufnahmen der Charakteristiken und den Widerstandsmessungen bei verschiedenen Frequenzen zogen, daß nämlich die Leitfähigkeitskurve von der Frequenz unabhängig ist. Im Hinblick auf die Greinacherschen Messungen über die Frequenzabhängigkeit des Wechselstromeffektes wurde die Gleichrichtung bei einer noch höheren Frequenz verglichen. Tabelle 15a und b gibt die Messungen für 375 sec und 1640 sec wieder bei verschiedenen Gleich- und Wechselspannungen. Auch hier ist die Übereinstimmung im ganzen eine gute. Die Abweichungen im einzelnen verteilen sich ziemlich gleichmäßig nach beiden Seiten und lassen jedenfalls keine Abnahme des Effektes bei der höheren Frequenz erkennen, wie sie Geinacher für den Wechselstromeffekt oberhalb 1000 sec findet. Vielleicht ist die Erklärung für die von Greinacher beobachtete Abnahme des Wechselstromeffektes darin

Tabelle 15
Kristall III,15 V=375

Volt ~	Volt = 1	2	4	6	−7 · 10 Amp.
0.9	9.1	4.6	1.8	1.0	
1.8	19.2	14.0	11.4	5.7	
3.6	41.8	35.9	49.3	19.3	
5.4	41.7	50.8	67.9	37.8	
7.2	46.6	63.9	69.0	48.7	

V=1640

Volt ~	1	2	4	6	−7 · 10 Amp.
0.9	11.0	6.8	3.0	1.5	
1.8	19.1	19.5	10.9	5.3	
3.6	29.5	39.2	27.6	16.3	
5.4	40.5	51.4	53.2	36.7	
7.2	46.6	60.9	68.2	49.3	

zu suchen, daß er zur Berechnung des „reinen" Wechselstromeffektes von der Gleichrichtung bei gleichzeitigem Gleich- und Wechselstrom die geringe Gleichrichtung bei reinem Wechselstrom abzieht. Diese letztere kann nun teilweise eine anomale sein, d. h. von der Kurvenform der Wechselspannung abhängen (siehe § 9), und bei höheren Frequenzen infolge größerer Verzerrung der Wechselspannung stärker sein. Außerdem hat schon Greinacher selbst die Beobachtung gemacht, daß gerade die Gleichrichtung bei reinem Wechselstrom meist sehr inkonstant ist. Die eigenen Messungen an Selenkristallen bestätigen dies. An allen untersuchten Kristallen zeigte sich bei sinusförmiger Wechselspannung eine wenn auch meist sehr kleine Gleichrichtung, die sehr schwankte und häufig sogar ihr Vorzeichen mit der Höhe der Wechselspannung wechselte.

Tabelle 16. Kristall III,16.
Gleichrichtereffekt, nachdem 5' lang eine Gleichspannung von:

Volt ~	1	2	3	4	Volt
0.9	3	4	3	3	$\cdot 10^{-7}$ Amp.
1.8	10	4	6	5	
3.6	57	42	12	8	
5.4	69	60	14	14	angelegen
7.2	79	75	69	18	hat.

Tabelle 17. Kristall III,12 V=820

Volt ~	Volt = 0	0.5	1.0	2.0	3.0	
1	+0.4	4.0	4.3	1.4	1.2	· 15^{-7} Amp.
2	−0.2	10.2	15.3	11.4	4.2	positive Rich-
4	−4.0	16.9	30.4	40.2	31.4	tung im
6	−7.4	19.2	37.7	58.8	57.0	Kristall
8	−10.8	21.0	43.2	70.2	74.8	
1	+1.1	4.2	3.0	0.4	0.2	
2	+2.5	13.5	16.4	7.2	1.0	· 17^{-7} Amp.
4	+4.0	28.4	39.7	42.7	25.0	
6	+6.1	39.7	56.0	66.0	55.8	negative Rich-
8	+7.1	48.9	67.6	84.4	78.5	tung im Kristall

Siehe Tabelle 14 und 17 (erste Spalte). Besonders groß ist diese Gleichrichtung bei Kristall III, 16, der ja auch eine deutlich unsymmetrische dynamische Leitfähigkeitskurve zeigte. Hier ist auch bei überlagertem Gleichstrom die Gleichrichtung unregelmäßig. Im besonderen

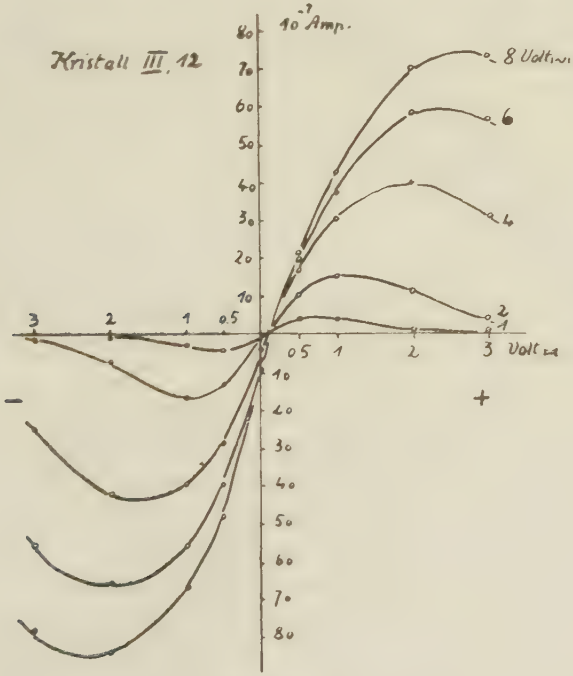
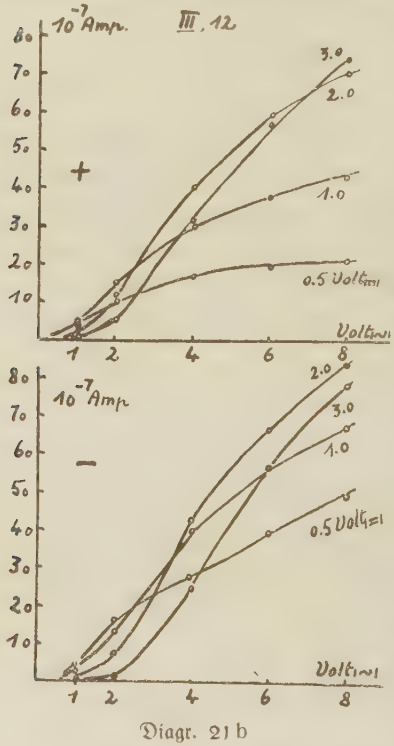


Diagramm 21a

wurde hier die Beobachtung gemacht, daß die Gleichrichtung des reinen Wechselstromes erheblich zurückgeht, wenn an dem Kristall längere Zeit (5') eine höhere Spannung angelegen hat (Tabelle 16). Dies spricht dafür, daß wir es bei dieser Gleichrichtung mit Vorgängen zu tun haben, die sich in den eben nie ganz symmetrischen Schichten zwischen Kristall und Elektrode nach den schon erwähnten Vorstellungen von G. Hoffmann abspielen. Hiernach ist einerseits das Schwanken der Gleichrichtung, andererseits das Zurückgehen der Unipolarität bei höheren Spannungen verständlich.



Diagr. 21 b

Diagramm 21 a und b (Tabelle 17) gibt noch die Gleichrichterwirkung für verschiedene Gleich- und Wechselspannungen bei Kristall III, 12 in beiden Richtungen des Kristalls wieder. Es bietet sich hier in beiden Richtungen dasselbe Bild wie bei den anderen Kristallen. Bemerkenswert ist nur, daß die Gleichrichtung für alle Wechselspannungen durch eine geringe Vorspannung von 0,1 Volt aufgehoben werden kann.

Es seien nun zum Schluß noch einige Bemerkungen zu den Ergebnissen von Greinacher und Ries über den Gleichrichtereffekt und den Wechselstromeffekt am Selen gestattet:

1. Ein Vergleich der Kurven, die die Abhängigkeit der Gleichrichtung von der Wechselspannung an Selenkristallen wiedergeben (Diagr. 19b; 20b; 21b) mit den entsprechenden Messungen von Greinacher (l. c. Seite 124, Fig. 4) lassen erkennen, daß die von Greinacher gefundene und als Beweis der Übereinstimmung des Wechselstromeffektes mit dem Lichteffekt herangezogene, annähernde Linearität zwischen Gleichrichtereffekt und Wechselspannung nur innerhalb eines sehr beschränkten Spannungsintervalles gilt. Bei niederen Spannungen wächst der Effekt mehr als linear, bei höheren weniger, wie es auch die Greinacherschen Kurven schwach andeuten.

Daß Greinacher den Wechselstromeffekt bei höherer Gleichspannung sehr viel kleiner findet, als bei niederer (in Analogie zum Lichteffekt) ist nach den Messungen an Selenkristallen ein zufälliges Ergebnis. Die Diagramme 19a; 20a; 21a zeigen, daß die Gleichrichtung mit wachsender Gleichspannung erst zunimmt, ein Maximum erreicht, und dann wieder abnimmt. Bei niederer Spannung hat also Greinacher offenbar in der Nähe des Maximums gemessen, bei der höheren Spannung weit darüber hinaus.

2. Ries untersucht die Gleichrichterwirkung am Selen, indem er einen Stromkreis aus einer normalen Selenzelle, der Sekundärspule eines Funkeninduktors, einer Batterie, die beliebig ein- und ausgeschaltet werden kann, und einem Galvanometer bildet. Er findet eine starke Gleichrichtung, auch wenn die Induktorspannung allein wirkt. Dieser Gleichstrom änderte seine Richtung nicht, wenn die Zelle bald in der einen, bald in den anderen Richtung eingeschaltet wurde. Hieraus ist zu schließen, daß es sich im wesentlichen hier um eine anomale, d. h. durch die Form der Spannungskurve bedingte Gleichrichtung handelt. Tatsächlich ist ja auch die Spannungskurve eines Funkeninduktors stark verzerrt (dem Öffnen des Primärstromes entspricht eine spitze Kurvenhälfte der Sekundärspannung, dem Schließen eine flache), sodaß eine starke anomale Gleichrichterwirkung zu erwarten ist, zumal da die Sekundärspannung ziemlich hoch ist.

Daß Gleichrichtereffekt und Wechselstromeffekt, wie Ries feststellt, stets beide zunehmen oder abnehmen, hat seinen Grund darin, daß eben beide Effekte auf dem Spannungseffekt beruhen bzw. beide durch die Form der dynamischen Charakteristik bedingt sind. Wird die Charakteristik durch irgendwelche äußere Einflüsse geändert, so müssen sich damit auch beide Effekte ändern. Man hat durch die Beobachtung dieser Effekte geradezu ein Mittel, die Änderungen des Spannungseffektes zu verfolgen.

So erklärt sich schließlich auch, daß Gleichrichter- und Wechselstromeffekt im Licht zurückgehen (von Ries G-Effekt genannt, auch von Greinacher schon festgestellt). Es entspricht dies der Tatsache, daß die Lichtempfindlichkeit des Selens bei Vergrößerung der Spannung (10) abnimmt (auch an Selenkristallen vom Verfasser im Gegensatz zu den Beobachtungen von F. C. Brown gefunden). Denn Abnahme der Lichtempfindlichkeit mit der Spannung und Abnahme des Spannungseffektes im Licht sind ja identisch. Ries hat insofern recht, die Verminderung des Gleichrichtereffektes im Licht als Folge der Widerstandsverminderung im Licht anzusehen, als eben auch der Spannungseffekt,

durch den die Gleichrichtung bedingt ist, bei dem geringeren Widerstand bzw. vergrößerten Strome im Licht auch geringer ist.

§ 11. Zusammenfassung.

1. Die von mehreren Forschern an Selenzellen ausgeführten Wechselstrommessungen werden auf isolierte Selenkristalle, die nach dem Verfahren von F. C. Brown durch Sublimation aus dem Selendampf hergestellt sind, ausgedehnt.

2. Es wird gezeigt, daß auch diese Kristalle den „Spannungseffekt" und die „Dunkelträgheit" besitzen. Aus diesen beiden Effekten wird gefolgert, daß zwischen einer statischen und dynamischen Charakteristik bezw. Leitfähigkeitskurve unterschieden werden muß.

3. Mit Hilfe der Joubertschen Methode werden Wechselstromdiagramme an Selenkristallen aufgenommen und daraus die dynamische Leitfähigkeitskurve bestimmt und mit der statischen verglichen. Die dynamische Kurve weicht von der statischen folgendermaßen ab: Bei höheren Spannungswerten liegt sie unter, bei niederen über der statischen Kurve. Während mit wachsender Wechselspannung die Leitfähigkeitskurve höher und flacher verläuft, ist ihre Form von der Frequenz der Wechselspannung innerhalb des Gebietes von 12—1700 Per/sec unabhängig.

4. Aus der besonderen Form der Leitfähigkeitskurve werden mehrere Folgerungen gezogen und experimentell geprüft, die zugleich eine Erklärung für eine Reihe bisher ungeklärter Wechselstrombeobachtungen älterer Forscher geben.

a) Es wird gefolgert, daß die Wechselstromleitfähigkeit des Selens (falls keine Polarisation vorhanden ist) kleiner ist als die Gleichstromleitfähigkeit bei gleich hoher Spannung, und durch Messungen mit der Frankeschen Maschine bestätigt.

b) Es wird rechnerisch gezeigt, daß bei bestimmter Form der Wechselspannungskurve eine Gleichrichterwirkung auftritt und damit zugleich eine Erklärung für die von H. Greiner gefundene Erscheinung der anomalen Gleichrichtung am Selen gegeben.

c) Es wird die aus der Leitfähigkeitskurve gefolgerte Gleichrichterwirkung der Selenkristalle bei gleichzeitigem Gleichstrom und Wechselstrom experimentell in ihrer Abhängigkeit von der Größe der Gleich- und Wechselspannung und der Frequenz untersucht. Die Ergebnisse werden zur Erklärung des von Greinacher gefundenen und Ries weiter untersuchten Wechselstromeffektes herangezogen und mit den Beobachtungen dieser Forscher verglichen.

§ 12. Literaturzusammenstellung.

1. B. Gudden und R. Pohl: (Zeitschr. f. Phys. 4, 206; 5, 176; 6, 248; 7, 65, 1921) Über den zeitlichen Anstieg und das Wesen der lichtelektrischen Leitfähigkeit.
2. A. Pocchettino und G. C. Trabachchi: (Il nuovo Cimento periodico di fisica 12, 335, 1906) Sul modo di comportarsi del Selenio rispetto alle corrente alternanti.
3. Chr. Ries: Das Selen, Diessen vor München, 1918.
4. A. Pochettino und G. C. Trabacchi: (Il nuovo Cimento periodico di fisica 13, 286, 1907) Ulteriori ricerche sul comportamento elettrico del Selenio.
5. A. Pochettino: (Rendiconti della Regia Accademia dei Lincei 18, 445, 1909) Sul comportamento delle ordinarie cellule al Selenio rispetto alla corrente alternata.
6. J. Luterbacher: (Annalen der Physik 33, 1392, 1910) Der Einfluß der elektromotorischen Kraft auf den elektrischen Widerstand des Selens.
7. H. Greinnacher: (Verhandl. d. deutsch. phys. Gesellsch. 18, 117, 1916), Licht und Elektrizität im Selen.
8. H. Greinacher und C. W. Miller: (Verhandl. d. deutsch. phys. Gesellsch. 18, 283, 1916) Anomale Gleichrichterwirkung im Selen.
9. H. Greinacher: (Verhandl. d. deutsch. phys. Gesellsch. 19, 51, 1917) Widerstand und Polarisation des Selens.
10. Chr. Ries: (Zeitschr. f. Feinmechanik 26, 1, 10, 1918) Ein neuer Lichteffekt; der Gleichrichtereffekt an lichtempfindlichen Zellen verschwindet im Licht.
11. F. C. Brown: (Physical Review 4, 85, 1914) The crystal forms of metallic selenium and some of their physical properties.
12. F. C. Brown: (Physical Review 5, 167, 1915) The electrical, the photoelectrical and the electro-mechanical properties of certain crystals of metallic selenium, with certain applications to crystal structure.
13. E. Orlich: Aufnahme und Analyse von Wechselstromkurven. Braunschweig, 1906.
14. G. Hoffmann: (Phys. Zeitschr. 22, 422, 1921) Zur Erklärung der unipolaren Leitung.
15. S. Datta: (Phil. Mag. 42, 463, 1921) On the variation of resistance of selenium with temperature.
16. H. Brandes: (E. T. Z. 1906, 1015) Über Abweichungen vom Ohmschen Gesetz, Gleichrichterwirkung und Wellenanzeiger der drahtlosen Telegraphie.

Die vorliegende Arbeit wurde in dem Institut für angewandte Elektrizität zu Göttingen ausgeführt. Dem Direktor des Instituts, meinem verehrten Lehrer, Herrn Prof. Dr. M. Reich, möchte ich auch an dieser Stelle für die mannigfache Förderung, die er mir hat angedeihen lassen, aufrichtigen Dank sagen. Auch dem Assistenten des Instituts, Herrn Privatdozenten Dr. A. Goetz, bin ich für zahlreiche Ratschläge zu Dank verpflichtet.

Lebenslauf.

Ich, Walther Bock, wurde am 24. Februar 1893 zu Göttingen als Sohn des Studienrates Prof. Dr. Bock geboren. Nach Absolvierung des hiesigen humanistischen Gymnasiums, Ostern 1912, genügte ich meiner Militärpflicht. Von Ostern 1913 ab widmete ich mich dem Studium der Mathematik und Physik an der hiesigen Universität. Im August 1914 rückte ich als Unteroffizier d. R. ins Feld, wurde im September 1914 bei Reims verwundet und geriet in französische Gefangenschaft. Im Oktober 1918 kehrte ich als Austauschgefangener nach Deutschland zurück und nahm mein Studium in der Mathematik, Physik und Chemie in Göttingen wieder auf. Seit dem Sommer 1921 arbeitete ich im Institut für angewandte Elektrizität unter Leitung von Herrn Prof. Dr. Reich. Ich besuchte unter anderen die Vorlesungen folgender Dozenten: Prof. Runge, Prof. Hilbert, Prof. Karathedory, Prof. Courant, Prof. Hecke, Prof. Landau, Prof. Riecke, Prof. Debye, Prof. Pohl, Prof. Frank, Prof. Reich, Prof. Windaus, Prof. Köth, Prof. Tammann, Prof. Coehn, Prof. Zsigmondy.